www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

13e JAARGANG No. 9, blz. 249-280 SEPTEMBER 1951

Philips Technisch Tijdschrift

BEHANDELENDE TECHNISCHE VRAAGSTUKKEN
SAMENHANGENDE MET DE PRODUCTEN, WERKWIJZEN EN ONDERZOEKINGEN
VAN DE N.V. PHILIPS' GLOEILAMPENFABRIEKEN

REDACTIE: NATUURKUNDIG LABORATORIUM DER N.V. PHILIPS' GLOEILAMPENFABRIEKEN, EINDHOVEN

DELTAMODULATIE, EEN NIEUW MODULATIESYSTEEM VOOR TELECOMMUNICATIE

door J. F. SCHOUTEN*), F. de JAGER en J. A. GREEFKES.

621.396.619.16

Voor het overbrengen van „informatie" als bijv. spraak of muziek, tracht men, rekening houdend met de eigenschappen van de overdrachtsweg enerzijds en met de karakteristieke eigenaardigheden van het over te brengen signaal anderzijds, een systeem met optimale eigenschappen te ontwerpen. Van recente datum stammen systemen in welke een quantisering van het signaal, zowel in de amplitude als in de tijd, wordt toegepast. In dit artikel wordt zulk een systeem beschreven. Het heeft als essentiële eigenschap dat gebruik wordt gemaakt van een speciaal soort tegenkoppeling. Vergeleken met andere quantiserende modulatiesystemen is een aanmerkelijke vereenvoudiging van de apparatuur verkregen.

Signaal en storing

De telecommunicatietechniek maakt heden ten dage een merkwaardige ontwikkeling door. Spraak en muziek gaat men overbrengen door een patroon van eenheidsignalen, zoals men dit reeds in de telegrafie kent.

De wens om op zo drastische wijze te breken met de gebruikelijke transmissiemethoden zoals bijv. amplitudemodulatie, is geboren uit de steeds toenemende moeilijkheden om ook op zeer grote afstand een storingsvrije ontvangst te waarborgen. In moderne draaggolftelefoniesystemen wordt het signaal bij transmissie per kabel over een luttele afstand van 100 km reeds 240 dB, dit is in een verhouding van 10^{24} : 1, verzwakt. Deze verzwakking, die van de orde van de verhouding van het uitgestraalde vermogen van de zon tot dat van een zaklantaarnlampje is, is op zichzelf geen bezwaar. Het is de prestatie van de telecommunicatie-techniek deze verzwakkingen, die op transcontinentale verbindingen tienduizenden dB kunnen bedragen, door een reeks tussengeschakelde versterkers (relaisstations) te compenseren. Maar behalve dat het signaal verzwakt wordt, wordt het ook gestoord. De storing kan o.a. bestaan uit geruis, uit overspreken uit naburige transmissiekanalen, en uit niveauvariaties van het signaal. Deze, op zich zelf geringe, effecten zijn over het gehele transmissiecircuit werkzaam, zodat de uiteindelijke storing van het ontvangen signaal ontstaat door een cumulatie van zeer kleine storingen.

Als een tafel is ondergestoft, kunnen wij deze reinigen door het stof weg te vegen; wij weten nl. wat tafel en wat stof is. Bij het genoemde communicatiesysteem weten wij aan de ontvangzijde niet welk aandeel van de ontvangen amplitude signaal en welk aandeel storing is. Dit betekent onuitwisbaarheid van het „transmissiestof", vandaar dat cumulatie van storingen bij de gebruikelijke communicatiesystemen niet te vermijden is.

Er zijn communicatiesystemen waarbij de storing wel onderscheidbaar is van het signaal. Met deze systemen is, bij gebruik van tussengeschakelde versterkerstations, ook op zeer grote afstand nog een nagenoeg ongestoord signaal te ontvangen. Alvorens deze systemen te behandelen, bespreken we enkele andere moderne transmissiemethoden, die als het ware de weg gewezen hebben naar het einddoel van de storingsonderdrukking. Deze methoden worden toegelicht in *fig. 1*.

*) N.V. Philips' Telecommunicatie Industrie, Hilversum.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

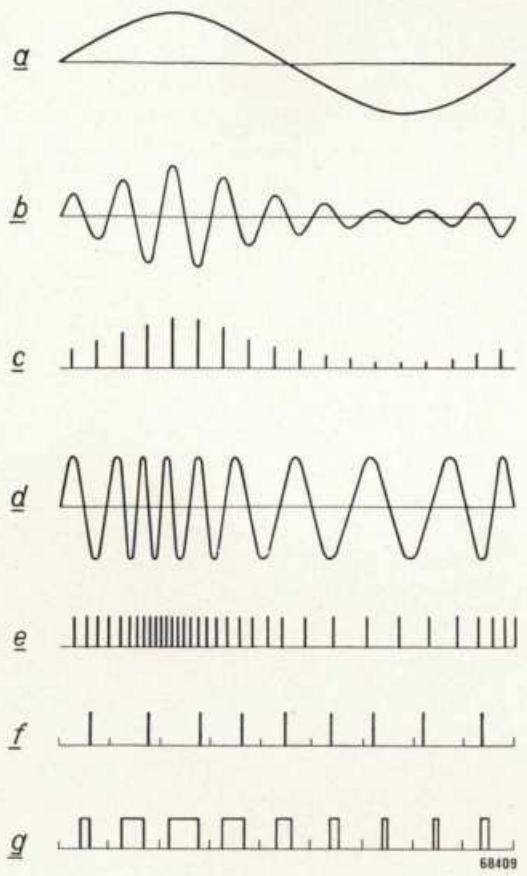


Fig. 1. Schematische voorstelling van diverse niet gequantiseerde modulatiesystemen. *a*) Het modulerende signaal. *b*) Draaggolf-amplitudemodulatie. *c*) Impuls-amplitudemodulatie. *d*) Draaggolf-frequentiemodulatie. *e*) Impuls-frequentiemodulatie. *f*) Impuls-tijdmodulatie (let op de door streepjes aangegeven tijdintervallen waarbinnen elke impuls zich kan bewegen). *g*) Impuls-duurmodulatie.

De strijd tegen cumulatie van storingen

Amplitudemodulatie van het over te brengen signaal (fig. 1*a*) op een draaggolf (fig. 1*b*) kan worden vervangen door amplitudemodulatie op een reeks equidistante impulsen: impuls-amplitudemodulatie (fig. 1*c*). Een signaal (spraak, muziek, beeld) is gegeven als een continue functie: de tijd is de onafhankelijke veranderlijke, als afhankelijke veranderlijke treedt op de geluidsdruk, resp. achter de opneemapparatuur een electrische spanning. Het blijkt dat, als men de grootte van deze spanning slechts kent op equidistante tijdstippen, het totale signaal, dwz. ook alle momentele waarden tussen deze tijdstippen in, volledig is te reconstrueren, mits de frequentieband van het signaal niet breder is dan de halve herhalingsfrequentie van de tijdstippen waarop de momentele waarde wordt gemeten. Deze tijdstippen moeten dus des te dichter bij elkaar liggen, naarmate de frequenties die het over te brengen signaal bevat een breder gebied bestrijken, hetgeen zonder meer begrijpelijk zal zijn.

De impuls-amplitudemodulatie past direct dit principe toe. In feite is deze methode geheel analoog aan draaggolf-amplitudemodulatie; de continue draaggolf wordt vervangen door discrete impulsen. Voor een over te dragen frequentieband van bijv. 3400 Hz wordt een impulsherhalingsfrequentie van ca 8000 Hz gebezigd. Wat betreft de onderscheidbaarheid van signaal en storing biedt deze methode geen enkel voordeel boven draaggolfmodulatie.

Ongeveer gelijktijdig met de impuls-amplitudemodulatie deed de frequentiemodulatie (fig. 1*d*) haar intrede in de telecommunicatietechniek. Bij deze methode wordt niet de amplitude, doch de frequentie van een draaggolf gemoduleerd. Ook hier kan de continue draaggolf worden vervangen door een reeks impulsen. Men krijgt dan impuls-frequentiemodulatie (fig. 1*e*)[1]). Een bijzondere vorm hiervan is impuls-tijdmodulatie (fig. 1*f*), ook wel impuls-plaatsmodulatie genoemd. Het signaal wordt hierbij opgebouwd uit impulsen die alle dezelfde amplitude en breedte bezitten, zg. eenheidsimpulsen. De boodschap wordt vastgelegd in het tijdpatroon van deze impulsen, en wel zodanig, dat elke impuls afhankelijk van de momentele waarde van het gespreksignaal een bepaalde plaats in het hem toekomende tijdinterval inneemt[2]). Hierbij doet zich nu een geheel nieuwe mogelijkheid van storingsbestrijding voor. Als nl. de storingen in de transmissieweg in zoverre beperkt zijn, dat zij de eenheidsimpulsen niet te zeer verminken, blijft het patroon behouden en kan het worden opgefrist door aan de ontvangzijde de gedeeltelijk verminkte impulsen te regenereren.

Toch kan ook hier niet een volledige onderscheidbaarheid van signaal en storing worden bereikt, en blijft dus het nadeel van cumulatie van kleine storingen bestaan. De storingen in de transmissieweg werken in eerste instantie op de amplitude van het overgebrachte signaal. Waren de impulsen volkomen rechthoekig van vorm, dan zou, indien de storing een bepaalde waarde niet overschrijdt, volledige onderscheidbaarheid mogelijk zijn. Doordat de impulsflanken echter steeds een eindige helling bezitten, is het tijdstip waarop een impuls aan de ontvangzijde wordt ontvangen,

[1]) Impuls-frequentiemodulatie bestaat in de natuur reeds millioenen jaren, nl. bij de transmissie van signalen langs de zenuwen der dieren. Bij de prikkeling van een zenuw plant zich een reeks electrische impulsen van gelijke amplitude langs de zenuw voort; het aantal impulsen per seconde (tot enige honderden) is een maat voor de sterkte van de prikkel.

[2]) Impuls-tijdmodulatie is al eens in dit tijdschrift ter sprake gekomen, zie C. J. H. A. Staal, Een apparatuur voor multiplex-impulsmodulatie, Philips techn. T. **11**, 133-144, 1949.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

dus de plaats van de impuls in zijn interval, nog enigszins variabel. De hierdoor veroorzaakte storing is niet te scheiden van het signaal, en dus zal weer cumulatie van storingen optreden.

De cumulatie bij impuls-tijdmodulatie is aanmerkelijk geringer dan bij impuls-amplitudemodulatie; evenzo is de storing bij draaggolf-frequentiemodulatie aanmerkelijk geringer dan bij draaggolf-amplitudemodulatie. Frequentiemodulatie en impuls-tijdmodulatie hebben aanleiding gegeven tot het fundamentele begrip, dat het mogelijk is de invloed van storingen te verminderen door de frequentieband van het overgedragen hoogfrequente signaal te verbreden. De impuls-tijdmodulatie, alsmede een variant hiervan, de impuls-duurmodulatie (welke berust op het principe dat de breedte der impulsen wordt gevarieerd overeenkomstig de momentele waarde van het gespreksignaal, fig. 1g), benutten deze mogelijkheid echter niet op een efficiente wijze.

Impuls-tijdmodulatie met behulp van rechthoekige impulsen zou zoals gezegd volledige onderdrukking van storingen opleveren; de frequentieband nodig voor het onvervormd overdragen van deze signalen is echter oneindig groot.

Quantisering van het signaal

Bij de impuls-tijdmodulatie worden eenheidsignalen gebezigd. Dit betekent een soort quantisering: alleen discrete waarden (in dit geval slechts de waarde 1) van de impulsamplitude worden toegelaten. De boodschap wordt echter bepaald door een continu te variëren patroon van deze impulsen in die zin, dat zij zich in de tijdschaal op ieder punt kunnen bevinden. Men kan nu een stap verder gaan, nl. door van de continue schaal van momentele waarden van het gespreksignaal slechts discrete waarden, bijv. de veelvouden van een bepaalde eenheid, te erkennen en over te seinen. In het dagelijks leven doen wij voortdurend iets dergelijks, door een lengte in kilometers, meters of millimeters, een temperatuur in graden of tiende graden, een tijdsduur in uren, minuten of seconden uit te drukken. De overweging bij deze onnauwkeurige opgave is, dat men in de practijk steeds met een beperkte nauwkeurigheid, afhankelijk van het gestelde doel, blijkt te kunnen volstaan.

Evenzo kan men de stappen waarin de momentele waarde van een spraak- of muzieksignaal wordt gemeten zodanig grof of fijn kiezen, dat een bepaalde kwaliteit van de weergave wordt verkregen. De winst die tegenover het verlies aan natuurgetrouwheid staat, is, dat men de werkzame storingen, mits beneden een zekere grens, volledig kan elimineren.

Dat dit zo is, willen wij aan het volgende voorbeeld illustreren. Keren wij terug naar de impuls-tijdmodulatie. De volledige quantisering hiervan betekent dat elke impuls in het hem toekomende tijdinterval slechts op een discreet aantal vastgestelde plaatsen kan voorkomen, zoals in *fig. 2* is toegelicht. Bewerken de storingen een verschuiving in de impulsplaatsen die kleiner is dan het halve verschil in tijd tussen twee der discrete plaatsen, dan weet men aan de ontvangzijde ondanks die storing nog precies welke impulsplaats, dus welk signaal wordt bedoeld. De storing is dus geheel onderscheidbaar van het signaal en daarmee volledig uitwisbaar, mits hij een zekere drempelwaarde niet overschrijdt.

Directe toepassing van het quantiseringsprocédé op dit of op een van de andere genoemde modulatiesystemen geeft dus de bedoelde storingsonderdrukking. Het is echter, zoals wij straks nog zullen zien, uit een oogpunt van rendement van het transmissiesysteem onvoordelig op deze wijze te werk te gaan.

Vandaar dat speciale modulatiemethoden zijn ontwikkeld om gequantiseerde signalen over te zenden. Een van deze methoden is de deltamodulatie, die wij nu zullen bespreken.

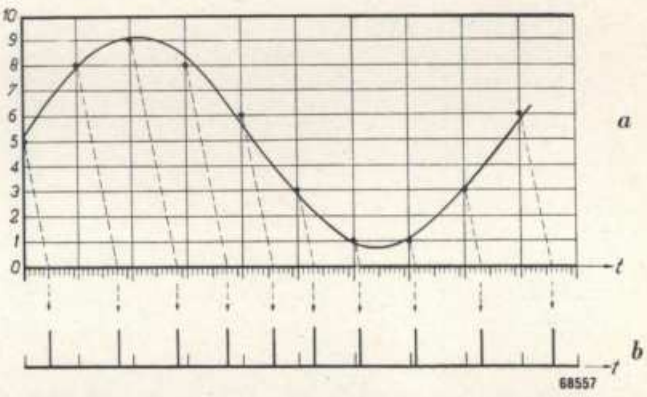


Fig. 2. Quantisering van de impuls-tijdmodulatie. *a*) De momentele signaalwaarde aan het begin van elk interval wordt benaderd door een gequantiseerde waarde. Deze wordt „vertaald" in de uitgezonden reeks van impulsen (*b*) door een overeenkomstige impulsplaats in het interval. In deze figuur is de quantisering in 11 stappen uitgevoerd. Voor elke impuls zijn dus 11 discrete plaatsen in zijn interval beschikbaar. Dit systeem wordt, daar het niet effectief is, in de practijk niet toegepast.

Deltamodulatie

Principe

Deltamodulatie is een impulsmodulatiesysteem. Op equidistante tijdstippen worden aan de zendzijde impulsen opgewekt. Deze worden echter niet alle uitgezonden. De beslissing of al of niet uitzenden zal plaats hebben, komt op de volgende wijze tot

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

stand. Uit de impulsen wordt op nog nader aan te duiden wijze een „trapjeskromme" gevormd. Deze trapjeskromme wordt vergeleken met het modulerende signaal (*fig. 3b*). Is op het ogenblik waarop een nieuw trapje moet worden toegevoegd de waarde van

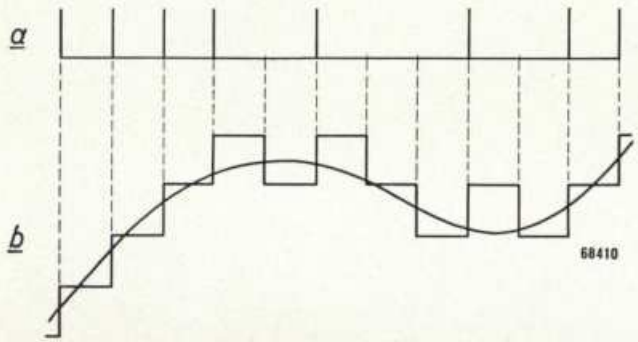


Fig. 3. Principe van de deltamodulatie. De door de zender geëmitteerde impulsenreeks (*a*) komt tot stand door vergelijking van het modulerende signaal (vloeiende kromme in *b*) met een in de zender opgebouwd trapjesvormig benaderingsignaal met equidistante trapjes. Is dit laatste kleiner dan het modulerende signaal, dan wordt een impuls uitgezonden. Is het groter, dan wordt de impuls onderdrukt. Aan de ontvangzijde wordt uit de impulsenreeks door integratie het benaderingsignaal, en daaruit door wegneming van de karteling de weergave van het modulerende signaal gevormd.

het modulerende signaal groter dan van het trapjesvormige signaal, dan wordt een positief trapje toegevoegd. Is het modulerende signaal kleiner dan het trapjesvormige signaal, dan wordt een negatief trapje gevormd. De trapjeskromme slingert zich dus om het modulerende signaal heen, en vormt er een gequantiseerd benaderingsignaal van. Met het vormen van een positief trapje nu correspondeert het uitzenden van een impuls; het vormen van een negatief trapje heeft tot gevolg dat op het tijdstip waarop een impuls zou kunnen worden geëmitteerd, deze impuls wordt onderdrukt. Wat aldus wordt uitgezonden, is de impulsenreeks van fig. 3*a*.

Aan de ontvangzijde wordt uit de ontvangen impulsenreeks weer het trapjesvormige benaderingsignaal gevormd. Dit wordt ten slotte omgezet in een vloeiend verlopend signaal, dat de weergave van het oorspronkelijke modulerende signaal vormt. Het is duidelijk dat, zo de storingen in de transmissieweg de impulsen als zodanig niet onherkenbaar verminken of verschuiven, volledige uitwisbaarheid van storingen mogelijk is.

De boven geschetste uiteenzetting is zeer schematisch. In de practijk is de methode minder eenvoudig. De essentie van de methode is er echter in neergelegd. Wij herhalen deze in de volgende, beknopte vorm.

Bij de deltamodulatie wordt uit een reeks uitgezonden equidistante impulsen, die de waarde 1 of 0 kunnen hebben, aan de ontvangzijde een signaal opgebouwd, hetwelk een zo goed mogelijke benadering van het oorspronkelijke modulerende signaal moet vormen. Dit benaderingsignaal wordt behalve aan de ontvangzijde ook aan de zendzijde opgebouwd. Men kan dus aan de zendzijde steeds het oorspronkelijke signaal vergelijken met de benadering welke met behulp van de gequantiseerde impulsen aan de ontvangzijde tot stand komt. Is het benaderingsignaal nu kleiner dan het ingangsignaal, dan wordt door de zender een impuls uitgezonden. Is het benaderingsignaal daarentegen groter dan het ingangsignaal, dan wordt de volgende impuls onderdrukt.

De „hulpontvanger" aan de zendzijde, die aldaar het benaderingsignaal levert, is in zijn eenvoudigste vorm een integrerend netwerk. De uitgangspanning van dit netwerk wordt in een verschilmeter, een eenvoudig weerstandsnetwerk, dat gevolgd wordt door een versterker, vergeleken met het oorspronkelijke signaal. Er wordt dus een soort tegenkoppeling in het zendcircuit toegepast. Deze tegenkoppeling onderscheidt zich echter door twee bijzonderheden van de gebruikelijke tegenkoppeling. Ten eerste is het tegenkoppelcircuit slechts op de momenten waarop beslist moet worden of een impuls al of niet zal worden uitgezonden, gesloten. Ten tweede is de spanning die de tegenkoppeling bewerkt niet evenredig met de verschilspanning, doch alleen afhankelijk van de polariteit van deze verschil-

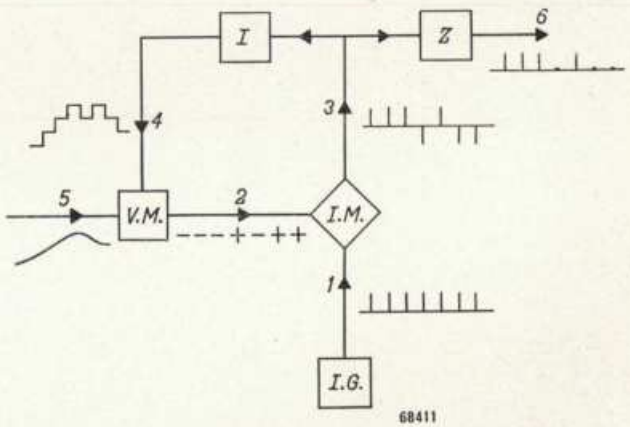


Fig. 4. Blokschema van de zender. Door de impulsgenerator *I.G.* wordt een reeks gelijke, equidistante impulsen *1* geleverd. Deze worden door de impulsmodulator *I.M.* òf onveranderd, òf met de tegengestelde polariteit naar de zender doorgegeven. Het gedrag van de impulsmodulator wordt bepaald door de polariteit van de verschilspanning *2*, die in de verschilmeter *V.M.* ontstaat door vergelijking van het modulerende signaal *5* en het trapjesvormige benaderingsignaal *4*, dat uit de impulsenreeks *3* wordt gevormd door integratie in de integrator *I* (hulpontvanger). De zender onderdrukt de negatieve impulsen en geeft het signaal *6* door aan de antenne of de transmissiekabel.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

spanning. Men zou dit dus een in tijd en amplitude gequantiseerde tegenkoppeling kunnen noemen.

In *fig. 4* is de apparatuur behorende bij de zendzijde door een blokschema weergegeven. We zien hier een impulsgenerator *I.G.*, welke een reeks gelijke impulsen met een herhalingsfrequentie van bijv. 60 000 of 100 000 impulsen per sec geeft. Deze impulsen moeten een impulsmodulator *I.M.* passeren. Is de spanning op het punt *2* negatief, dan wordt door *I.M.* een impuls afgegeven die hetzelfde teken heeft als de aankomende impuls; is daarentegen de spanning van *2* positief, dan wordt een impuls met tegengesteld teken naar punt *3* gestuurd. De uit de impulsmodulator *I.M.* komende impulsen worden toegevoerd aan een integrerend netwerk *I*, de hulpontvanger. Hier zal elke positieve impuls de uitgangspanning met een bepaald bedrag verhogen en elke negatieve impuls de uitgangspanning met eenzelfde bedrag verlagen. Op deze wijze ontstaat een trapjeskromme *4*, het benaderingsignaal. Dit laatste signaal wordt nu in de verschilmeter *V.M.* vergeleken met het modulerende signaal *5*. Deze geeft als uitgangspanning steeds het verschil aan tussen de beide signalen, en bestuurt hiermee de genoemde impulsmodulator. De volgende impuls is dus positief als de benaderingspanning op dit moment te laag is vergeleken met het ingangsignaal, negatief als de benaderingspanning te hoog is. De op deze wijze opgewekte reeks positieve en negatieve impulsen wordt behalve aan de hulpontvanger toegevoerd aan een zender *Z* (bijvoorbeeld een straalzender), welke de negatieve impulsen onderdrukt en de positieve impulsen uitzendt.

De verdere lotgevallen van de impulsen op hun weg door de aether zijn geïllustreerd in *fig. 5*. Het uitgezonden impulspatroon komt overeen met *6*, het ontvangen impulspatroon is ten gevolge van de in de transmissieweg optredende storingen meer of minder sterk vervormd en wordt bijvoorbeeld gegeven door de impulsserie *7*. Om nu hieruit het trapjesvormige benaderingsignaal te reconstrueren, maakt men aan de ontvangzijde (*fig. 6*) gebruik van een impulsmodulator welke in principe op dezelfde wijze werkt als de impulsmodulator aan de zendzijde. Dat wil zeggen: deze impulsmodulator laat de uit een impulsgenerator *I.G.* komende impuls (reeks *8*) ongewijzigd door als de binnenkomende impuls groter is dan een zekere waarde *s* (waarvoor in de regel de halve hoogte van de onvervormde impuls genomen wordt), en hij geeft een impuls van tegengesteld teken af, als de binnenkomende impuls kleiner is. Aan de uitgang van de impulsmodulator wordt dan de impulscombinatie *9* verkregen, die

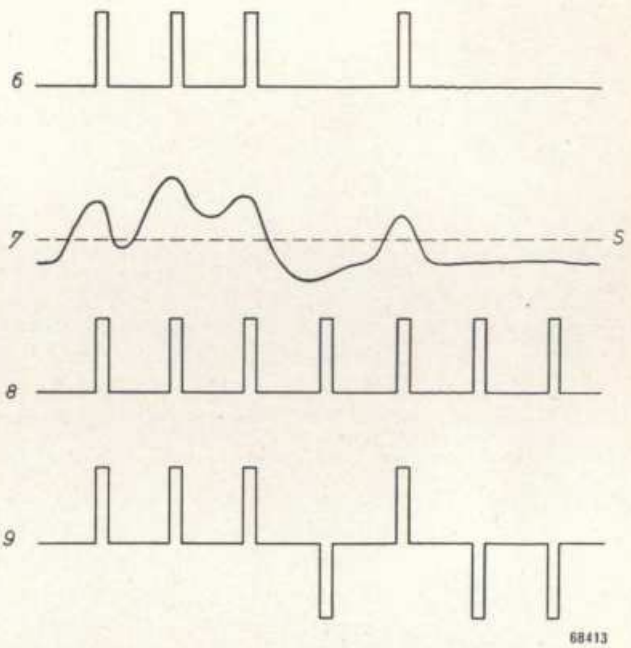


Fig. 5. De door de zender uit fig. 4 uitgezonden impulsenreeks *6* wordt op de transmissieweg vervormd, bijv. tot het signaal *7*. Dit signaal beïnvloedt een impulsmodulator in de ontvanger zodanig, dat, als de impulsamplitude boven een zeker niveau *s* ligt (welk niveau meestal gelijk aan de halve oorspronkelijke impulshoogte wordt genomen), de door een impulsgenerator opgewekte impulsen *8* met de goede polariteit worden doorgegeven. Ligt het signaal *7* onder het niveau *s*, dan worden de door de generator opgewekte impulsen in de impulsmodulator vervangen door impulsen met tegengestelde polariteit. Zo ontstaat de impulsenreeks *9*.

identiek is met het signaal *3* (zie figuren 4, 5 en 6). (De impulsgenerator moet daarbij nog gesynchroniseerd worden met de binnenkomende impulsen. De hiervoor nodige apparatuur is eenvoudigheidshalve in het schema van fig. 6 weggelaten.)

Bij het toevoeren van deze impulsserie aan een integrerend netwerk *I* ontstaat hetzelfde trapjes-

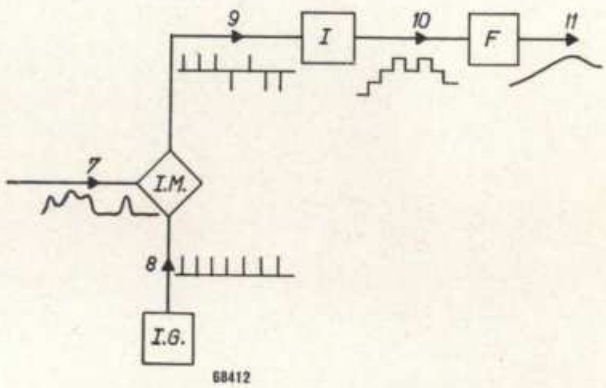


Fig. 6. Blokschema van de ontvanger. Het vervormde signaal *7* beïnvloedt de werking van de impulsmodulator *I.M.* op de bij fig. 5 beschreven wijze. De door de impulsgenerator *I.G.* opgewekte impulsen *8* worden al of niet met de goede polariteit doorgegeven, en het signaal *9* dat zo ontstaat wordt door een integrator *I* omgevormd tot de trapjeskromme *10*. In het laagdoorlatend filter *F* wordt hieruit het continu verlopende signaal *11* gevormd. Dit signaal is de reproductie van het oorspronkelijke aan de zender toegevoerde signaal.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

vormige signaal (*10*) dat ook aan de zendzijde is opgewekt (signaal *4*). Laat men dit signaal nu nog een laagdoorlatend filter *F* passeren, dan wordt de scherpe karteling weggenomen en er resulteert een continu signaal *11* dat een zeer grote overeenkomst vertoont met het oorspronkelijke ingangsignaal.

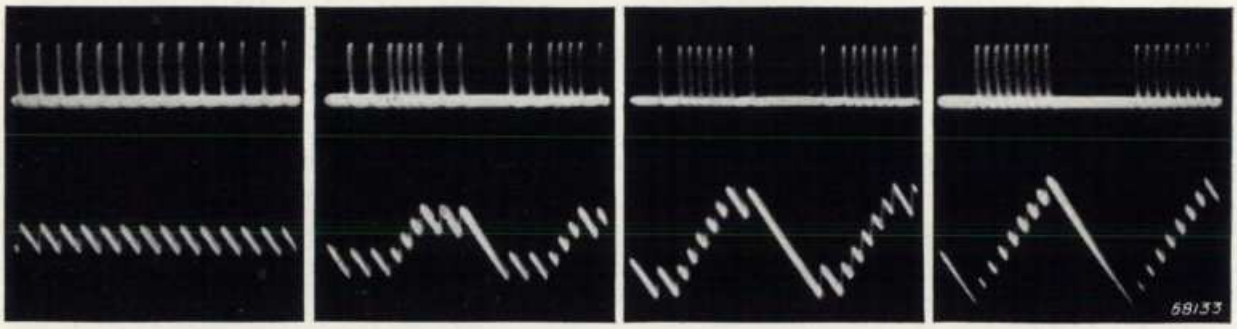
Op deze wijze kan men dus in de transmissieweg nog een stoorsignaal van maximaal de halve impulshoogte toelaten, zonder dat van deze storingen iets in het eindsignaal merkbaar wordt.

Geluidsweergave door het deltamodulatiesysteem

Het zal duidelijk zijn, dat het trapjesvormige benaderingsignaal (en dus ook het hieruit verkregen continue uitgangsignaal) toch altijd nog kleine afwijkingen zal vertonen ten opzichte van het oorspronkelijke signaal. Is het modulerende signaal sinusvormig, dan verkrijgt men aan de ontvangzijde een sinusvormig signaal tegen een achtergrond van geruis, het zogenaamde quantiseringsgeruis, dat ontstaat door de benadering van de momentele waarden van het gespreksignaal door discrete waarden. Hoe groter de impulsherhalingsfrequentie, deze bandbreedte is minstens gelijk aan de halve herhalingsfrequentie van de impulsen. Dit is dan ook uit physisch oogpunt te beschouwen als de prijs die men moet betalen voor de verkregen storingsonderdrukking. Echter vormt dit in het bijzonder voor straalzenders geen overwegend bezwaar, aangezien het in dit frequentiegebied gemakkelijker is de bandbreedte te vergroten dan de verhouding tussen signaal en storing.

In de practijk richt men de impulsmodulator zo in dat alleen impulsen van de waarden 1 en 0 worden afgegeven. Men werkt dan niet met een trapjesvormige, doch met een min of meer zaagtandvormige benadering van het ingangsignaal. Het principe van de schakeling wordt hierdoor echter niet veranderd.

In *fig. 7* zijn enkele oscillogrammen van een dergelijk benaderingsignaal opgenomen, tezamen met de hierbij behorende impulsenreeksen. Deze uit eenheidsimpulsen opgebouwde benaderingsignalen worden, zoals gezegd, aan de ontvangzijde nog met behulp van een laagdoorlatend filter van hun scherpe karteling ontdaan en geven dan een reproductie van het (in dit geval sinusvormige) ingangsignaal.



a *b* *c* *d*

Fig. 7. Zaagtandvormige benaderingspanning en de daarmee corresponderende uitgezonden impulsenreeks, voor een laagfrequent sinusvormig veranderend signaal (frequentie 4000 Hz). De herhalingsfrequentie van de door de generator geleverde impulsen is 64 kHz. *a*) De sinuskromme heeft amplitude nul. Beurtelings zijn de uitgezonden impulsen 1 en 0. *b*) en *c*) De amplitude wordt geleidelijk groter, en daarmee verandert het patroon van de impulsenreeks. *d*) De amplitude is nu zo groot geworden dat een volledige uitsturing, zelfs oversturing, van het systeem plaats heeft. Nog grotere amplituden zullen geen ander impulspatroon bewerkstelligen.

hoe geringer evenwel dit quantiseringsgeruis wordt. In de practijk kan men bij een impulsfrequentie van 40 000 impulsen per seconde nog een duidelijke „zanderigheid" in het overgebrachte spraaksignaal opmerken, doch bij een impulsfrequentie van 100 000 impulsen per seconde is van dit quantiseringsgeruis vrijwel niets meer te merken. De voor de transmissie benodigde bandbreedte is wegens deze hoge impulsfrequentie aanmerkelijk groter dan bij directe modulatie van het signaal op een draaggolf, want De frequentie van het ingangsignaal is in het beschouwde geval 4000 Hz, de impulsherhalingsfrequentie 64 000 impulsen per seconde. In de vier opnamen ziet men hoe bij toenemende amplitude van het over te brengen signaal de configuratie der impulsen zich wijzigt. In fig. 7*a* is het ingangsignaal nul. De uitgezonden impulsen zijn dan beurtelings 1 en 0, en daar het zaagtandvormige benaderingsignaal nu de grondfrequentie 32 000 Hz heeft, dus geen frequenties bevat die in het doorlaat-

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

gebied van het filter gelegen zijn, zal het uitgangsignaal achter het filter in de ontvanger eveneens de waarde nul hebben. In de figuren 7*b* en 7*c* is de amplitude geleidelijk groter geworden, in fig. 7*d* is de maximale amplitude bereikt die aan de ontvangzijde kan worden waargenomen. Grotere ingangsamplituden zullen geen ander benaderingsignaal geven, en dus aan de ontvangzijde hetzelfde uitgangsignaal veroorzaken. Het blijkt dus dat bij de deltamodulatie een begrenzing van de over te dragen amplituden optreedt. De begrenzing wordt bereikt als de helling van de signaalspanning een zekere waarde bereikt, die overeenkomt met het permanent zenden van positieve impulsen. Hoe hoger de frequentie van het ingangsignaal is, des te kleiner is de maximale amplitude. Wij komen hierop nog terug.

Andere methoden voor het overbrengen van gequantiseerde signalen

De deltamodulatie past, zoals uit het voorgaande blijkt, twee principes toe, nl. het integreren van impulsreeksen, en tegenkoppeling op een speciale wijze. De betekenis van de methode is door de tegenkoppeling in wezen deze, dat de zender alleen reageert op datgene wat ten opzichte van de vroegere toestand is veranderd. Er wordt telkens slechts een correctie op het voorafgaande signaal uitgezonden.

Een ander modulatiesysteem dat zich van gequantiseerde signalen bedient, is de impuls-codemodulatie [3]). Deze werkt als volgt. Er wordt evenals bij de deltamodulatie slechts onderscheid gemaakt tussen het wel of niet aanwezig zijn van een impuls. Om met behulp van dit „alles of niets"-beginsel desondanks meer dan twee amplitudeniveaus te kunnen onderscheiden, worden de momentele waarden van het gespreksignaal niet door één (al dan niet aanwezige impuls) aangeduid, doch door een zg. codegroep van 5 of 7 equidistante impulsen, die elk de waarde 1 of 0 kunnen hebben. De positie van een impuls in de codegroep bepaalt zijn betekenis. Dit positieprincipe komt ook voor in getalstelsels (waar het omstreeks het jaar 600 door Indische mathematici voor het eerst stelselmatig is toegepast [4])). Wij kunnen alle getallen in het tientallig stelsel aangeven met behulp van slechts 10 symbolen (cijfers) doordat de positie van een cijfer in een getal zijn waarde bepaalt: eenheid, tiental, honderdtal enz. Bij de impuls-codemodulatie wordt niet het tientallig, doch het tweetallig stelsel gebruikt, dat principieel eenvoudiger is. De plaats van een impuls in de codegroep bepaalt of de impuls de waarde 1, 2, 4, 8 enz. zal hebben. Met codegroepen van 5 impulsen kan men op deze wijze 32 verschillende signaalwaarden aanduiden. In *fig. 8* is dit toegelicht.

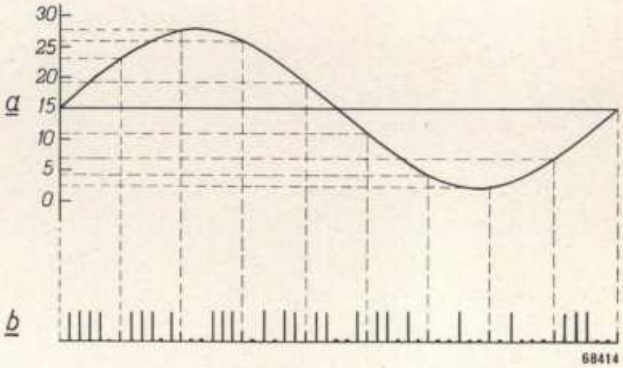


Fig. 8. Principe van de impuls-codemodulatie, met codegroepen van 5 impulsen. De waarde van het uit te zenden signaal (*a*) aan het begin van elk tijdinterval overeenkomend met een codegroep wordt afgerond tot een der discrete waarden 0 tot 31 en „vertaald" in een impulspatroon (*b*). Dit patroon wordt gevormd door het al dan niet aanwezig zijn van impulsen op de 5 door punten aangegeven plaatsen binnen de groep. Men past het systeem toe, dat elke plaats correspondeert met een „binaal" in het tweetallig stelsel, en drukt de grootte van de gemeten amplitude op deze wijze uit in het tweetallig stelsel. Van links naar rechts hebben de vijf punten in een codegroep dan resp. de betekenis 1, 2, 4, 8 en 16 amplitude-„eenheden".

De deltamodulatie is in zoverre als een variant van de impuls-codemodulatie te beschouwen, dat bij beide systemen gebruik wordt gemaakt van een codering van de uit te zenden signalen. De impuls-codemodulatie gebruikt 5 resp. 7 coderingseenheden (soms ook wel meer), de deltamodulatie, althans in de hier beschreven eenvoudige vorm, past een codering met behulp van één eenheid, nl. één stap in de trapjeskromme, toe. Dit is mogelijk dank zij het reeds beschreven feit dat bij de deltamodulatie slechts correcties op het signaal worden uitgezonden, bij de impuls-codemodulatie echter telkens de volledige signaalwaarden.

Met de invoering van de impuls-codemodulatie deed ten vierde male een tweetallige vijfeenhedencode haar intrede in de telecommunicatietechniek. In 1837 bouwden Cooke and Wheatstone tussen Euston en Camden Town in Engeland een transmissiesysteem van vijf koperen draden, die aan de ontvangzijde verbonden waren met een vijfnaalden-telegraaf, welke twintig verschillende letters kon aanwijzen. In 1926 verkreeg Rainey octrooi op een codesysteem voor beeldtelegrafie dat als voorloper van de huidige impuls-codemodulatiesystemen is te beschouwen. De moderne telex, waarvan het principe reeds door Baudot in 1875 was uitgevonden, gebruikt een codesysteem met gewoonlijk 5 eenheden, dat de ietwat grillige Morse-code van de telegrafie vervangt. (Die „grilligheid" van de Morse-code berust op het feit, dat de lengte van de tekens is aangepast bij de veelvuldigheid waarmee de tekens voorkomen, en heeft dus een zeer bepaalde betekenis.)

[3]) Zie bijv. W. M. Goodall, Telephony by pulse code modulation, Bell System Technical Journal **26**, 395-409, 1947.
[4]) Zie bijv. B. v. d. Waerden, Ontwakende Wetenschap, blz. 61 en volgende, Noordhoff, Groningen 1950.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Een vergelijking van de systemen is slechts te maken op grond van de theorie welke zich bezighoudt met het algemene probleem van de overdracht van informatie, en waarin aan het begrip informatie een goed gedefinieerde betekenis wordt toegekend. Dit zou ons hier te ver voeren. Wij willen slechts enkele resultaten van de vergelijking meedelen, en in die vergelijking ook de (hypothetische) gequantiseerde impuls-tijdmodulatie, zoals beschreven op pag. 251, betrekken. Wij moeten twee soorten storing onderscheiden, nl. de storing die inhaerent is aan het systeem zelf, en de storing die in de transmissieweg optreedt. Bij niet gequantiseerde systemen treedt in theorie slechts een verwaarloosbare storing (geruis) in de zender en in de ontvanger op. Sluiten wij zender en ontvanger direct op elkaar aan, dan is dus een geheel ongestoorde weergave bereikbaar. In de transmissieweg echter vindt, zoals reeds gezegd, een cumulatie van zeer kleine storingen plaats. Indien de storingen in de transmissieweg beneden een zekere drempelwaarde blijven, is de transmissiestoring geheel weg te werken door quantisering. De quantisering betekent, zoals we gezien hebben, dat in de zender zelf „storing" wordt geïntroduceerd, nl. het quantiseringsgeruis. Deze storing doet echter niet mee aan de cumulatie. Bovendien is het quantiseringsgeruis willekeurig klein te maken, door de bandbreedte die het overgedragen hoogfrequente signaal beslaat te vergroten. De transmissiestoring kunnen we echter niet verminderen.

De gequantiseerde impuls-tijdmodulatie heeft tot eigenschap dat de drempelwaarde van de storing in de transmissieweg, waar beneden deze storing onwerkzaam is, relatief klein is. De impulsen mogen slechts over een geringe afstand in het hun toekomende interval worden verschoven, zal het patroon niet verloren gaan. Men kan verder berekenen, dat het quantiseringsgeruis met toenemende bandbreedte f bij dit systeem omgekeerd evenredig met f afneemt.

In gecodeerde systemen, zoals deltamodulatie en impuls-codemodulatie, is, juist door de codering, een veel grotere storing in de transmissieweg toelaatbaar. Bovendien blijkt in beide systemen het quantiseringsgeruis veel sterker af te nemen met toenemende bandbreedte en wel resp. volgens een $f^{-5/2}$-wet en ongeveer volgens een 2^{-f}-wet. De vroeger genoemde inefficientie van de gequantiseerde impuls-tijdmodulatie komt hiermede wel duidelijk tot uiting. Dezelfde inefficientie vindt men bij alle andere gequantiseerde maar niet gecodeerde systemen.

De oorzaak waardoor deltamodulatie en impuls-codemodulatie beide voordeliger zijn uit een oogpunt van storingsonderdrukking dan gequantiseerde, niet gecodeerde, normale systemen, ligt bij het eerste systeem in de tegenkoppeling, bij het tweede systeem in het gebruik van meer eenheden in de codering. Men kan echter ook bij de deltamodulatie een codering in meer eenheden toepassen, bijv. door de verschilmeting niet alleen naar het teken te beoordelen, doch bovendien de grootte van het verschil in verscheidene stappen te verdelen, en in het uitgezonden impulsenbeeld uit te drukken. Op deze wijze is een verbetering van de verhouding van signaal tot storing bij gelijkblijvende bandbreedte te verkrijgen. Men kan aantonen dat bij het gebruik van tegenkoppeling het aantal eenheden voor het bereiken van eenzelfde weergavekwaliteit minder behoeft te bedragen dan zonder tegenkoppeling.

Eigenschappen van de deltamodulatie

Keren wij nu terug naar het beschreven systeem van deltamodulatie. Uit hetgeen boven gezegd is volgt, dat deltamodulatie bij dezelfde bandbreedte uit een oogpunt van quantiseringsgeruis minder voordelig is dan impuls-codemodulatie. Het blijkt dat, om een bepaalde weergavekwaliteit bij spraak te bereiken, de bandbreedte bij deltamodulatie ongeveer 50% hoger dient te zijn dan die welke bij impuls-codemodulatie voor dezelfde kwaliteit vereist is. Hier tegenover staat echter, dat de apparatuur zeer veel eenvoudiger is. Niet alleen vervalt een coderingsinrichting, maar bovendien kunnen, omdat bij de deltamodulatie alle impulsen een gelijkwaardige betekenis hebben, de tolerantie-eisen voor de schakeling aanzienlijk lager gesteld worden. Men bepaalt immers in de verschilmeter alleen de polariteit van een spanning en kan dus gebruik maken van versterkers voor de verschilspanning die niet aan lineariteitseisen voldoen. Ook mag een buisinstelling, of de impulsgrootte, langzaam nog enigszins met de tijd veranderen, daar de tegenkoppeling er voor zorg draagt dat in dat geval geen vervorming van het signaal optreedt. Ten slotte blijkt de constructie van het netwerk in de terugkoppelweg, evenals die van het integrerende netwerk in de ontvanger, weinig critisch te zijn. Het kan nl. bij eventuele afwijkingen geen aanleiding geven tot niet-lineaire vervorming (wat wel het geval is bij de voor impuls-codemodulatie toegepaste netwerken) doch alleen de frequentiekarakteristiek van het gehele systeem enigszins veranderen. Dit laatste kan met een eenvoudige egalisatie verholpen worden. De ingewikkelde quantiserings-apparatuur die nodig is bij impuls-codemodulatie, moet zorg-

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

vuldig lineair worden gemaakt, terwijl bij de deltamodulatie voor het quantiseren een eenvoudig en reeds van nature lineair netwerk gebruikt wordt.

Op de technische uitvoering van de schakeling zullen we in dit artikel niet dieper ingaan. Terloops willen wij echter nog vermelden dat het mogelijk is aan de frequentiekarakteristiek van het netwerk in de terugkoppelweg voor de boven het audiogebied gelegen frequenties een geheel ander karakter te geven dan voor de lagere frequenties, en daarmee het quantiseringsgeruis te verkleinen.

Zowel impuls-codemodulatie als deltamodulatie geven slechts de mogelijkheid tot overbrenging van niet te grote signalen, terwijl zeer kleine signalen aan de ontvangzijde niet kunnen worden onderscheiden van het signaal nul. Deze begrenzing wordt bij de impuls-codemodulatie bepaald door de grootte van de stappen in de 5- of 7-eenhedencode: het kleinste over te brengen signaal correspondeert met het overseinen van een codegroep met de „signaalwaarde" 1, het grootste over te brengen signaal met het overseinen van een codegroep met de signaalwaarde 32 resp. 128. De begrenzing is dus onafhankelijk van de frequentie.

Zoals we reeds hebben gezien aan de hand van fig. 7*d*, wordt bij de deltamodulatie de begrenzing aan de kant van de grote signaalwaarden bereikt als de signaalspanning een zekere helling heeft, overeenkomend met het permanent zenden van positieve impulsen. Is de signaalspanning daarentegen zo klein, dat de benaderingspanning ondanks de aanwezigheid van het signaal de in fig. 7*a* afgebeelde vorm behoudt, en dus afwisselend wel en niet een impuls wordt uitgezonden, dan is achter het laagdoorlatende filter in de ontvanger niets van het signaal te merken. Door speciale schakelingen kan men bereiken dat de minimaal weer te geven signaalsterkte (drempelwaarde) wel iets kleiner is dan uit deze redenering volgt, doch de minimale amplitude die men aan de ontvangzijde nog kan waarnemen blijft steeds eindig.

Het begrenzen van de signaalamplitude door het bestaan van een maximale helling bij deltamodulatie heeft wat de reproductie van het geluid betreft het belangrijke gevolg dat de maximale amplitude die men kan overbrengen omgekeerd evenredig is met de frequentie. Daar in ons geval de drempelwaarde van de ontvangen signalen niet van de frequentie afhangt, betekent dit dat de dynamiek, dit is de verhouding tussen de maximale en minimale amplituden aan de ontvangzijde, kleiner wordt naarmate de frequentie toeneemt.

Deze afwijking van de ideale weergave van het audiosignaal komt juist overeen met een eigenschap inhaerent aan de spraak of de muziek resp. aan het menselijk oor, zodat zij de transmissie wat haar physiologische uitwerking betreft niet nadelig beïnvloedt. De maximale amplitude van de geluidsdruk in het spectrum van spraak of muziek neemt nl. af met toenemende frequentie, en de voor het oor waarneembare dynamiek eveneens (voornamelijk bij hogere frequenties).

Een derde grootheid, en een die in de normale acoustica niet voorkomt, is het gamma van het transmissiesysteem. Onder het gamma willen wij verstaan het aantal onderscheidbare stappen tussen de maximale en minimale overgebrachte amplituden. Bij de deltamodulatie wordt het gamma kleiner naarmate de frequentie toeneemt; hoewel uit physiologische onderzoekingen is gebleken dat dit in het gebied der spraakfrequenties tot een achteruitgang van de weergavekwaliteit zou moeten leiden, is hiervan in de practijk niets te merken.

Voor frequenties boven 6000 Hz treedt ook bij het gehoor een vermindering van het gamma met toenemende frequentie op. Daar is dus de deltamodulatie in twee opzichten bij de eigenschappen van het menselijk oor aangepast.

Dit voert ons tot het volgende, zeer belangrijke punt. Een optimaal transmissiesysteem is daardoor gekarakteriseerd, dat het datgene overdraagt wat overgedragen moet worden, doch ook niet meer dan dat. Neemt het signaal als functie van de frequentie sterk in vermogen af, dan zijn eventuele mogelijkheden van het systeem voor overdracht van grote vermogens bij hoge frequenties overbodig en ongewenst. Wanneer, zoals het geval blijkt te zijn, het menselijk oor een geringere dynamiek in het hogere frequentiegebied waarneemt, dan mag in een optimaal geconstrueerd systeem ook niet de mogelijkheid tot overdracht van een grotere dynamiek bestaan. Dit verklaart waarom bij de deltamodulatie met een relatief geringe bandbreedte kan worden volstaan. De aanpassing van dit systeem aan de eigenaardigheden zowel van het spraaksignaal als van het oor heffen nl. de mathematische afwijkingen van de ideale weergave ten dele op.

De diepere betekenis van de deltamodulatie

De deltamodulatie behoort, omdat zij in essentie op tegenkoppeling berust, tot de familie der regelsystemen en servomechanismen, waarvan zij echter met haar quantisering, zowel in de amplitude als in de tijd, een nauwelijks bestudeerd lid is.

Zoals reeds is gezegd, worden alleen correcties op het voorgaande signaal uitgezonden. Dit wordt bewerkt met behulp van het integrerende netwerk. Mathematisch integreren zou echter betekenen dat zelfs het verre verleden tot de huidige amplitude zou bijdragen. Aangezien er kennelijk een limiet is

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

voor de tijd waarbinnen vroegere signaalwaarden van een spraak- of muzieksignaal verband houden met de momentele waarde, mogen wij deze vroegere waarden geleidelijk vergeten. Een zich ontladende condensator (zoals die in ons integrerende *RC*-netwerk voorkomt) levert aldus de eerste nuttige variant op de zuiver mathematische integratie. Een tweede variant bestaat daarin dat men, door toevoeging van meer elementen aan het netwerk, tracht te bereiken, dat het uitgangsignaal overeenkomt met de waarschijnlijkste voortzetting van het over te zenden signaal (die voortzetting waarbij de eerste of meerdere afgeleiden van de signaalspanning naar de tijd niet veranderen). De zender behoeft dan, via de verschilmeter, niets anders te doen dan de correcties ten opzichte van deze waarschijnlijkste voortzetting over te zenden.

Wij kunnen dit ook anders formuleren. Ieder signaal: spraak, muziek of beeld, is gekenschetst door zekere correlatie-eigenschappen, dat is door een zeker verband dat tussen de opvolgende signaalwaarden bestaat. Zo is de correlatie-eigenschap van de baan van een hardrijder op schaatsen dat deze voornamelijk een rechte is, die van de baan van een schoonrijder dat ze sinusvormig is. Ieder overzenden van het bekende deel van het signaal, dat is dus van het aandeel in de amplitude dat uit de correlatie-eigenschappen volgt, is overbodig, juist omdat dit bekend is. Ieder optimaal transmissiesysteem moet dus aan de zendzijde deze correlatie-eigenschappen verdisconteren en slechts datgene overzenden wat als nieuw en individueel is te beschouwen.

Dit betekent dat het uitgezonden signaal bij een optimale transmissie de statistische eigenschappen van geruis bezit, dwz. géén correlatie heeft [5]).

Het is de functie van het tegenkoppelcircuit, dit verdisconteren van de correlatie-eigenschappen te realiseren, hetgeen dus betekent dat de eigenschappen van het tegenkoppelnetwerk bepaald moeten worden door de aard van het over te dragen signaal enerzijds en die van het oor (of oog) anderzijds.

[5]) S. Goldman, Proc. Inst. Radio Engrs. **36**, 584, 1948.

Samenvatting. In dit artikel wordt de ontwikkeling van verschillende modulatiesystemen beschreven, welke ontwikkeling gericht is op het zo storingsvrij mogelijk overbrengen van spraak-, muziek- of beeldsignalen. De storing die in draaggolfmodulatiesystemen en ook bij de zg. impuls-tijdmodulatie optreedt, ontstaat door cumulatie van zeer kleine storingen in de transmissieweg. Deze cumulatie kan worden opgeheven door de over te brengen signalen te quantiseren, zowel in tijd als in amplitude. Het systeem van deltamodulatie, dat hierop berust, wordt beschreven en vergeleken met andere systemen die van quantisering gebruik maken (impuls-codemodulatie). Het blijkt dat voor het bereiken van een goede weergave bij redelijke bandbreedte van het transmissiesignaal de deltamodulatie een relatief zeer eenvoudige apparatuur vereist, omdat een codering met behulp van slechts één eenheid wordt toegepast. Dat dit mogelijk is, komt doordat bij de deltamodulatie rekening wordt gehouden met de correlatie-eigenschappen van het signaal, en wel door toepassing van een speciaal soort tegenkoppeling in de zender, en doordat de eigenschappen van het systeem zich aansluiten bij die van spraak en muziek en van het menselijk oor.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

GEIGER-MÜLLER-TELLERS

door N. WARMOLTZ. 537.542:539.16.08:621.387.424

De tijd dat Geiger-Müller-tellers uitsluitend in het laboratorium werden gebruikt, is voorbij. Heden ten dage wordt dit instrument, behalve als meetapparaat voor radioactieve straling bij kernphysische onderzoekingen en bij de productie van kernenergie, toegepast als indicator van stralingsgevaar, o.a. bij de burgerlijke en militaire verdediging. Bovendien vormt het een onmisbaar uitrustingstuk van „prospectors" voor radioactieve ertsen. Dat het mogelijk is geweest met een dergelijk gevoelig instrument meetapparaten in de robuuste en kleine vorm te vervaardigen die voor vele van deze toepassingen wordt gewenst, is voor een deel te danken aan de ontdekking van de invloed die bepaalde bijmengsels tot het vulgas, zoals halogenen, op de eigenschappen van een telbuis hebben.

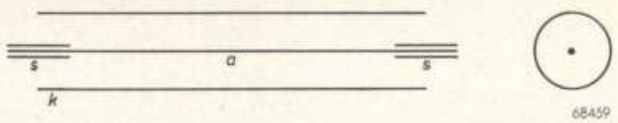
Historie van de telbuis

Het aantonen van afzonderlijke elementaire deeltjes, atoomkernen en stralingsquanta door middel van de ontladingsverschijnselen die zij kunnen veroorzaken in een electrische ontladingsbuis — in principe bestaande uit een met gas gevuld vat waarin twee koude electroden zijn aangebracht — dateert uit 1908, toen Rutherford en Geiger er in slaagden met een dergelijke inrichting α-deeltjes te tellen. De telbuis van deze onderzoekers is sedertdien aanmerkelijk verbeterd. De verbetering ging hand in hand met het verkrijgen van dieper inzicht in de processen die zich in de buis afspelen. Wij zullen in dit artikel een overzicht geven van de historische ontwikkeling van de telbuis, en enkele nieuwe Philips-telbuizen die uit deze ontwikkeling zijn voortgekomen bespreken.

De eerste telbuis die door de genoemde onderzoekers werd gemaakt, had uiterlijk vrijwel geheel de vorm van de tegenwoordige. Het was een cylindrische buis met twee coaxiale electroden van cirkelvormige doorsnede (*fig. 1*), waarvan de buitenste als kathode en de binnenste, die de vorm heeft van een dunne draad, als anode dienst doet. De spanning tussen de electroden bedroeg ca 1300 V, de buis was gevuld met kooldioxyde of lucht onder een druk van enkele cm Hg.

De te tellen α-deeltjes werden in de buis binnengelaten door een zeer dun mica venster of door een kraan met grote boring, die in verbinding stond met een gedeeltelijk geëvacueerde ruimte waarin zich het radioactieve preparaat bevond. Elk binnenkomend α-deeltje ioniseert door botsing een aantal gasmoleculen. De electronen die worden vrijgemaakt bewegen zich onder invloed van het electrische veld naar de anodedraad en vormen daarbij voornamelijk in de omgeving van deze draad een aantal ionen en electronen. Alle gevormde deeltjes worden ten slotte door het veld naar de electroden getrokken, en veroorzaken een spanningstoot over een weerstand in serie met de teller. Het waarnemen van deze spanningstoot geschiedde in de experimenten van Rutherford en Geiger met een electrometer. Een volgend deeltje levert een nieuwe spanningstoot; door registratie van de spanningstoten kan men de deeltjes tellen.

Er ontstond geen zelfstandige ontlading in de buis. Het door het binnenkomende α-deeltje gevormde aantal ionen werd slechts met een zekere factor vermenigvuldigd.



68459

Fig. 1. Schematische voorstelling van een Geiger-Müller-telbuis: a anodedraad, k kathodecylinder, s afschermbussen voor de uiteinden.

De grootte van de spanningstoot hangt o.a. af van de plaats waar en de richting waaronder het α-deeltje de telbuis binnentreedt (deze zijn nl. van invloed op de wegen die de deeltjes beschrijven). Om deze afhankelijkheid te verminderen, wijzigden Geiger en Rutherford de vorm van de telbuis: de cylindrische constructie werd vervangen door een bolvormige; een bolletje dat als anode dient, staat in het middelpunt van een half-bolvormige kathode. De gasvulling was helium van ca $^1/_3$ atmosfeer druk. Met dit gas onder deze relatief hoge druk was het mogelijk reeds bij lagere spanningen de gewenste ionenvermenigvuldiging te verkrijgen.

Met behulp van deze apparatuur en de in

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

die tijd beschikbare electrometers, konden slechts α-deeltjes worden aangetoond; de door β- en γ-stralen veroorzaakte ionisatie was daarvoor, ondanks de versterking door de aanwezigheid van het gas, te gering. Vandaar dat in 1913 Geiger er toe overging de druk van het gas te verhogen, en hogere spanningen te gebruiken, aangelegd over een grote weerstand in het voedingscircuit van de buis. Door een geschikte vormgeving der electroden werd bovendien de veldsterkte in de buis nog groter gemaakt: de kathode bestond uit een spitse punt, die werd geplaatst tegenover een vlakke plaat welke als anode diende. De gasvulling was lucht onder atmosferische druk; de spanning bedroeg 1000 tot 1800 volt. Ten gevolge van dit alles werden de oorspronkelijk gevormde ionen en electronen nu zo sterk vermenigvuldigd dat een zelfstandige gasontlading optrad. Deze bleek echter (wat voor de bruikbaarheid essentieel was) de eigenschap te bezitten uit zichzelf snel af te breken, zodat wederom voor een binnentredend deeltje een spanningstoot kon worden waargenomen.

Met een dergelijke teller konden ook β- en γ-stralen worden aangetoond. Onderscheid te maken tussen de verschillende soorten deeltjes was niet mogelijk, daar de grootte van de spanningstoot over de weerstand slechts bepaald werd door de eigenschappen der zelfstandige ontlading en niet door de aard van het ioniserende deeltje. Richtingsafhankelijkheid van de teller bestond nagenoeg niet meer.

De spitse kathode was moeilijk reproduceerbaar te vervaardigen en werd later daarom vervangen door een zeer klein bolletje. De anode bleef een vlakke plaat. Nog later keerden Geiger en Müller (1928) terug tot de cylindrische opstelling en wel met luchtvulling (druk 5 cm). De (positieve) draad was sterk geoxydeerd, hetgeen de doving van de ontlading vergemakkelijkte.

Hiermede was in principe de Geiger-Müller-telbuis geconstrueerd, zoals die heden ten dage gebruikt wordt.

In de volgende jaren ontstond een grote verscheidenheid van telbuizen, die vooral van elkaar afweken door de aard van de gasvulling en de behandeling der electroden. Om de invloed van de gasvulling na te gaan, zullen wij ons nu nader bezighouden met de processen welke zich in het gas afspelen als een ioniserend deeltje de teller binnenkomt. Een meer gedetailleerd inzicht in deze processen werd pas verkregen nadat de telbuis al vele jaren nuttig was gebruikt, en ook tegenwoordig zijn nog niet alle problemen die zich hierbij voordoen geheel tot oplossing gebracht.

Het gebruik van een gasontlading voor het aantonen en tellen van deeltjes

Wij beschouwen een cylindrische teller met positieve draad, en gevuld met een voor teldoeleinden geschikt gas. Wij bestralen de teller met een constante, niet te sterke, bron. Een binnenkomend deeltje vormt, zoals reeds is gezegd, door ionisatie van de gasmoleculen langs zijn baan een aantal paren ionen en electronen. De lading die per cm baanlengte bij een bepaalde druk gevormd wordt hangt sterk af van de aard van het deeltje en van zijn snelheid. De totale gevormde lading wordt bepaald door de baanlengte in de teller, welke lengte afhangt van de afmetingen van de teller, en de plaats en de hoek van inval van het deeltje.

Brengen wij nu, via een weerstand, een spanning V tussen anode en kathode aan die kleiner is dan de ionisatiespanning V_i van het gas, dan worden slechts de gevormde ionen en electronen — op de verliezen door recombinatie na — aan de electroden verzameld. Ook als we de spanning verhogen tot enige malen V_i, worden in de teller nog weinig nieuwe deeltjes gevormd, omdat de snelheden die de electronen bereiken daarvoor merendeels te gering zijn. De aankomst van de ionen en electronen op de electroden kan als een spanningstoot S over de genoemde weerstand met een gevoelige versterker waargenomen worden. De grootte van deze spanningstoot geeft bij bekende geometrie van teller en bron een aanwijzing voor de aard en de snelheid van het deeltje; indien de aard bekend is, kan men de snelheid bepalen, en omgekeerd.

Bij toenemende spanning op de teller nemen de verliezen door recombinatie af, waardoor de spanningstoot S groter wordt. Dit gaat door totdat de recombinatie verwaarloosbaar klein is geworden, daarna behoudt S bij verdere toeneming van V een constante waarde. Bij welke spanning dit gebeurt, hangt af van de vorm van de buis en van de gasvulling.

Men zegt dat de telbuis bij deze lage spanningen (enkele tientallen tot enkele honderden volts) als ionisatiekamer werkt. In *fig. 2* is schematisch het verband tussen de grootte van de spanningstoot en de spanning op de telbuis aangegeven. Het bovenbeschreven gebied correspondeert met het stuk OAB van de kromme.

De buisspanning is tijdens het stroomvoeren van de buis, als gevolg van de spanningsval over de serieweerstand, natuurlijk lager dan de voedingspanning. Bij de ionisatiekamer is deze spanningsdaling echter wegens de zeer kleine stroomsterkte verwaarloosbaar.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Om een indruk van de gevoeligheid van een als ionisatiekamer werkende telbuis te geven, zij vermeld dat een α-deeltje van 3,3 MeV ongeveer $5 \cdot 10^4$ ion-electron-paren per cm baanlengte vormt in lucht van 1 atmosfeer druk. Nemen wij aan dat de baanlengte in de kamer juist 1 cm is, dan betekent dit een lading die naar de electroden stroomt van $8 \cdot 10^{-15}$ coulomb. De topwaarde van

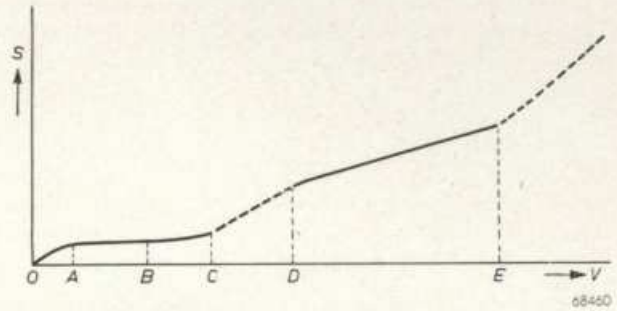


Fig. 2. Karakteristiek van een telbuis bij constante, niet te sterke bestraling. Als ordinaat is de grootte S van de waargenomen spanningstoten uitgezet, als abscis de voedingspanning V. In het gebied OA worden ten gevolge van recombinatie nog niet alle door een binnenkomend deeltje of quantum gevormde ionen aan de electroden verzameld, in het gebied AB is dit wel het geval. OAB noemt men het gebied waarin de buis als ionisatiekamer werkt. Van B tot C treedt versterking van de spanningstoten op door ionisatie van het gas door de gevormde electronen (proportionele gebied). Van C tot D gaan andere processen hierbij ook medewerken, waardoor de reproduceerbaarheid vermindert. D correspondeert met de startspanning voor een zelfstandige ontlading, het gebied DE is het Geiger-Müller-gebied, waarin de ontlading na korte tijd weer gedoofd wordt. Voorbij E treedt ten slotte een continue ontlading op.

de spanning die door het afvloeien van deze lading veroorzaakt wordt op de serieweerstand, kunnen wij globaal berekenen door aan te nemen dat de lading ten volle aangewend wordt om de parallel aan de weerstand aanwezige capaciteit te laden. Voor een capaciteit van 10 $\mu\mu$F (de gebruikelijke kleine waarde voor de ingangscapaciteit van een versterker verbonden aan een telbuis) vinden wij dan een spanning van maximaal $8 \cdot 10^{-4}$ V. Voor een electron (β-deeltje) dat de telbuis binnentreedt met een energie van 1 MeV is het aantal gevormde ion-electron-paren ongeveer een factor 1000 kleiner, dus bedraagt de spanningstoot $8 \cdot 10^{-7}$ volt. De onvermijdelijke stoorspanning (geruisspanning) zal bijv. 10^{-5} V bedragen. Het is duidelijk dat dan een α-deeltje wel, een β-deeltje niet aan te tonen zal zijn.

Verhoogt men de spanning op de buis verder, dan begint in de buis in toenemende mate aanslag en ionisatie plaats te vinden van de gasmoleculen door de in het veld versnelde electronen. Ten gevolge hiervan wordt aan de electroden een grotere lading verzameld, waarmee een grotere spanningstoot correspondeert. Men kan op deze wijze een versterking tot 1000 maal verkrijgen. In fig. 2 is nu het gebied BC bereikt, wij hebben de teller van Rutherford en Geiger. In dit gebied (evenals trouwens in de gebieden van lagere buisspanning) is de spanningstoot evenredig met het aantal door het invallende deeltje oorspronkelijk gevormde ionen. Aan tellers die in het bijzonder in het gebied BC werken is op grond van deze eigenschap de naam proportionele tellers gegeven; zij onderscheiden zich van de ionisatiekamer door het bezit van een vermenigvuldigingsfactor veel groter dan 1. In dit gebied geldt hetzelfde als bij de ionisatiekamer gezegd is over de richtingsafhankelijkheid en aard van de te tellen deeltjes. Ook hier zijn de stromen door de buis nog zo klein, dat de buisspanning tijdens het lopen van stroom nauwelijks daalt.

Door de spanning verder te verhogen, komen we in het gebied CD. Behalve ionisatie door electronen gaan nu ook andere processen een rol spelen, en wel voornamelijk het vrijmaken van electronen uit de kathode door de positieve ionen en door de straling die ontstaat bij de terugkeer van aangeslagen gasmoleculen naar de grondtoestand. De totale versterking wordt zeer groot, doch dit gaat ten koste van de reproduceerbaarheid, waardoor dit gebied voor kwantitatieve metingen niet zo goed bruikbaar is.

Bij spanningen hoger dan die welke bij het punt D in fig. 2 behoort, treedt een zelfstandige ontlading op zodra in het gas een geringe ionisatie door een invallend deeltje plaats vindt. Men noemt de spanning die bij punt D behoort de startspanning voor een zelfstandige ontlading. De grootte van de ontladingstroom hangt niet af van het oorspronkelijk gevormde aantal ionen, dus van de aard van het deeltje dat de teller binnenkomt, maar wel van de spanning op de buis, en bovendien van de grootte van de serieweerstand, daar de spanningsval over deze weerstand nu niet meer te verwaarlozen is en deze weerstand daarom de buisspanning tijdens de ontlading mede bepaalt.

Opdat een volgend deeltje kan worden waargenomen, dient de zelfstandige ontlading gedoofd te zijn voordat dit deeltje de teller binnenkomt. Bij sommige gasvullingen geschiedt het doven zoals we straks zullen zien spontaan indien slechts de serieweerstand een zekere grootte bezit, bij andere tellers wordt daartoe, door middel van een speciale schakeling, de spanning op de buis na elke ontlading verlaagd. Ook deze tellers leveren dus spanningstoten. Deze hebben meestal een langere duur dan die in de proportionele teller; de vermenigvuldiging van de oorspronkelijk gevormde lading is echter veel groter, nl. ca 10^7 maal.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Het is dit gebied dat steeds in Geiger-Müller-tellers[1]) wordt gebruikt. Een electron van 1 MeV kan nu spanningstoten opwekken van bijv. 1 tot 100 V op de serieweerstand.

Verhoogt men de spanning boven de met het punt E corresponderende waarde, dan dooft de teller niet meer uit zichzelf, en zeer moeilijk met behulp van de gebruikelijke eenvoudige schakelingen. Dit gebied wordt voor teldoeleinden nooit gebruikt.

In het vervolg zullen wij ons beperken tot de Geiger-Müller-tellers; de ionisatiekamer en de proportionele teller, die ook voor vele toepassingen worden gebruikt, laten wij verder buiten beschouwing.

De eigenschappen van de Geiger-Müller-teller

Tot nu toe hebben wij alleen gesproken over de grootte van de spanningsimpulsen, die ontstonden door versterking van de oorspronkelijk gevormde ladingen. Wij willen ons nu afvragen, inhoeverre het aantal impulsen dat de Geiger-Müller-teller geeft een juiste maat is voor het aantal binnentredende deeltjes. Zoals wij straks zullen zien, geeft in het algemeen niet elk binnenkomend deeltje aanleiding tot een impuls: het rendement van de teller is door verschillende oorzaken kleiner dan 100%.

Het blijkt allereerst dat de buisspanning op het rendement van vele Geiger-Müller-tellers weinig invloed heeft. Wij zetten als functie van de buisspanning in een grafiek uit het aantal impulsen per tijdseenheid dat door een Geiger-Müller-teller wordt gegeven als deze wordt bestraald door een constante bron. Een dergelijke telkarakteristiek is in *fig. 3* voorgesteld, voor een bron van gemiddelde sterkte. In het gebied DE, dat wij boven al hebben aangeduid, hangt het aantal impulsen per tijdseenheid weinig en dan nog slechts lineair van de voedingspanning af. Men noemt het gebied DE het plateau van de telbuis, en men kiest voor metingen de voedingspanning gewoonlijk ergens in dit gebied. De helling van het plateau wordt uitgedrukt door de procentuele toeneming van het aantal impulsen per tijdseenheid per 100 V spanningsverhoging. Voor een goede telbuis is het de gewoonte voor de helling van het plateau een waarde te verlangen die kleiner is dan ca 10% per 100 V. De plateaulengte moet bijv. minstens 100 V bedragen.

[1]) In de literatuur wordt kortheidshalve vaak gesproken over Geigertellers; gezien de historische ontwikkeling, verdient de aanduiding Geiger-Müller-teller de voorkeur.

Het is goed dat men zich, in verband met deze eisen, rekenschap geeft van de wijze waarop de telbuis zal moeten werken. Beschouwen wij eens een telbuis met een plateauhelling van 10% per 100 V. Stabiliseert men de buisspanning (van ca 1000 V) bijv. tot op 1 V (dit kan gemakkelijk), dan veroorzaken de overblijvende spanningsvariaties een variatie van het aantal impulsen per tijdseenheid bij constante bestraling van niet meer dan 0,1%. Dit is veel minder dan de onzekerheid die bij de verschillende metingen optreedt als gevolg van veranderingen in de geometrie van de opstelling van telbuis en preparaat; deze bedraagt, ook wanneer met de grootst mogelijke zorg wordt gewerkt, altijd nog enige procenten. Bij gebruik van gestabiliseerde spanningen zou dus een minder vlak plateau dan het genoemde ook bruikbaar zijn. Wordt echter een niet gestabiliseerde spanningsbron gebruikt of wordt de teller met batterijen gevoed (die steeds een geleidelijk spanningsverloop vertonen), dan is een tamelijk vlak plateau natuurlijk wel wenselijk. Ook voor tellers waarvan het gehele plateau verschuift gedurende de levensduur is een geringe helling van belang; bij goede tellers gebeurt dit laatste echter nauwelijks.

De geringe helling van het plateau van een Geiger-Müller-teller is ten dele het gevolg van de speciale vorm en opstelling van de electroden. Bij een telbuis bestaande uit twee vlakke evenwijdige platen is de kans op het ontstaan van een ontlading groter naarmate de door het invallende deeltje

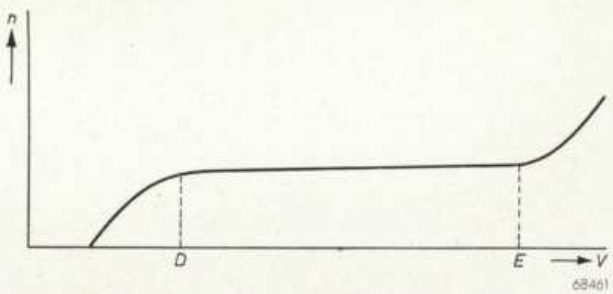


Fig. 3. Telkarakteristiek van een Geiger-Müller-teller. Uitgezet is langs de ordinaat het aantal (n) getelde deeltjes per tijdseenheid bij constante bestraling, langs de abscis de spanning V in de buiskring. Het gebied DE (de letters hebben dezelfde betekenis als in fig. 2) noemt men het plateau van de buis.

gevormde ion-electron-paren dichter bij de kathode ontstaan, daar dan de weglengte van de electronen, en daarmede de kans op het vormen van nieuwe ion-electron-paren, groter is. Met toenemende spanning breidt zich het gebied waarin de ion-electron-paren gevormd mogen worden om nog met een gegeven kans een ontlading te veroorzaken, uit. Daardoor stijgt het getelde aantal deeltjes bij een constante bestraling; dit betekent een aanzienlijke plateauhelling. Bij de cylindrische opstelling der electroden en de gebruikelijke gasvullingen echter, waarbij het gebied van grote veldsterkte geconcentreerd is om de anodedraad, ioniseren de door het invallende deeltje gevormde electronen het gas

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

alleen in de nabijheid van deze draad. Alle electronen, behalve de enkele die zéér dicht bij de anodedraad gevormd worden of die aan de vrije einden van de telbuis ontstaan, doorlopen het gunstige gebied, en hebben daardoor dezelfde kans om nieuwe ion-electron-paren, en daarmee een ontlading, te vormen. Deze kans is, behalve geheel in het begin van het plateau, niet van de spanning afhankelijk, hetgeen een geringe plateauhelling betekent. (Bij sommige gasvullingen wordt een gedeelte van de ver van de anodedraad gevormde electronen weggevangen; dit heeft een daling van de gevoeligheid van de teller ten gevolge, maar de helling van het plateau blijft gering.)

Dat desondanks het plateau niet altijd geheel vlak verloopt, heeft de volgende oorzaken:

1) Het optreden van zg. „na-ontladingen". Soms laat de ontlading die door het invallend deeltje veroorzaakt is, in de telbuis zoveel restladingen of moleculen in aangeslagen metastabiele toestanden achter (eventueel op de electrodenoppervlakken) dat er hierdoor een zekere kans ontstaat op het vormen, na kortere of langere tijd, van een tweede ontladingstoot. De kans op deze na-ontladingen neemt toe als de spanning groter wordt. Vanzelfsprekend is hierbij de gebruikte schakeling ook van invloed.

2) Het bestaan van eind-effecten. Bij toenemende spanning breidt het gebied aan de vrije einden waarin een electron met een bepaalde kans een ontlading vormt zich uit, waardoor het „gevoelige volume", dus het aantal tellingen, toeneemt.

Het rendement van een Geiger-Müller-teller blijkt voor niet te sterke bestralingen niet of nauwelijks af te hangen van de bestralingsintensiteit. Het hangt echter wel sterk af van de aard van de deeltjes, en van de constructie van de buis. Zo worden tellers voor zachte straling (energie-arme β-deeltjes, zachte röntgenstraling) vaak van een weinig absorberend venster (mica venster) voorzien, en wordt de aard van het gas zodanig gekozen, dat de deeltjes of quanta een grote kans hebben de gasmoleculen te ioniseren[2]). Tellers voor harde γ-stralen daarentegen worden bij voorkeur voorzien van een wand van een zwaar metaal, bijv. lood, waarin de γ-quanta vele electronen vrij maken, die op hun beurt weer gasmoleculen ioniseren. Het rendement van deze teller is veel geringer.

Terwijl dus het rendement van een Geiger-Müller-teller voor niet te grote bestralingsintensiteiten nagenoeg niet van de intensiteit afhangt, is desondanks voor zeer zwakke bestralingen het aantal impulsen niet meer evenredig met de intensiteit. Dit is geïllustreerd in *fig. 4*. Langs de abscis is hier uitgezet het aantal deeltjes (bijv. electronen) dat per tijdseenheid de teller binnenkomt, langs de ordinaat staat het aantal spanningstoten dat per tijdseenheid wordt waargenomen. Voor het gemak nemen we aan dat het rendement bij een

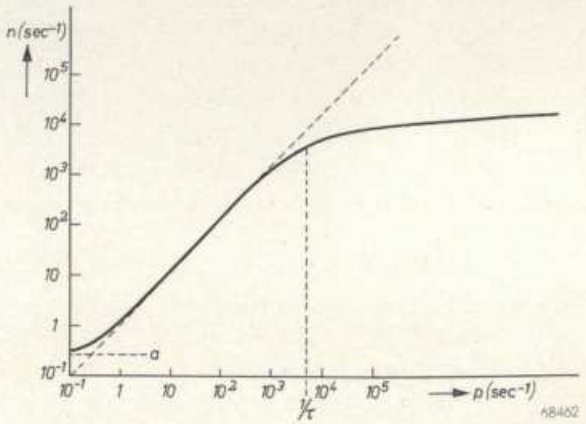


Fig. 4 Het aantal impulsen per seconde n dat de telbuis geeft is uitgezet als functie van het aantal deeltjes p dat de teller per seconde binnentreedt, voor het geval van een β-stralenteller met een rendement 100% bij gemiddelde bestralingsintensiteit. In het gebied van kleine bestralingsintensiteit is de achtergrond, door a aangegeven, een beperkende factor voor de meetnauwkeurigheid. Bij zeer grote stralingsintensiteit stelt het oplossend vermogen van de teller een grens aan het aantal impulsen dat wordt aangegeven. Dit oplossend vermogen wordt bepaald door de eindige onwerkzame tijd van de teller, τ; de kromme buigt naar rechts om als p, dus n, van de orde van grootte van $1/\tau$ wordt.

gemiddelde bestralingsintensiteit precies 100% bedraagt, de helling van de lijn is daar dan 45°. Bij kleine bestralingsintensiteit wordt een groter aantal impulsen waargenomen dan correspondeert met één impuls per invallend deeltje. Dit komt doordat steeds een zekere achtergrond aanwezig is. Hieronder wordt verstaan het aantal impulsen dat per tijdseenheid ontstaat zonder dat een stralingsbron in de buurt wordt gebracht. Het is duidelijk dat deze achtergrond bij het meten van zwakke stralingen van het grootste belang is. Toch sluit zijn aanwezigheid de mogelijkheid van een nauwkeurige meting van zwakke stralingen niet uit. Wij willen dit nog even toelichten. Zij het aantal impulsen dat gedurende een zekere periode aan de achtergrond is te wijten B (dit getal kan reeds van te voren worden gemeten), en het aantal impulsen dat aan de te meten stralingsbron gedurende die periode moet worden toegeschreven L, dan is het totale aantal gemeten impulsen $B + L$, waaruit L kan worden berekend.

[2]) Zie voor deze problemen: J. Bleeksma, G. Kloos en H. J. Di Giovanni, Een röntgendiffractie-apparaat met Geigerteller, Philips techn. T. **10**, 1-13, 1948.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

De grootheid $B + L$ nu is door de statistische verdeling van de tijdstippen waarop de impulsen ontstaan behept met een fout die evenredig is met $\sqrt{B + L}$. De relatieve fout in L is dus $\sqrt{B + L}/L$. Door de telperiode te vergroten, kan men deze relatieve fout zo klein maken als men wil, ook al is B/L van de orde van 1 of nog groter (sterke achtergrond, zwakke bron). Naarmate echter de achtergrond zwakker is, kan men voor een voorgeschreven nauwkeurigheid met een kortere waarnemingstijd volstaan. Om deze reden wenst men dat de achtergrond van een Geiger-Müller-teller zo gering mogelijk is.

De achtergrond wordt voornamelijk veroorzaakt door de steeds aanwezige kosmische straling, doch heeft vaak een grotere waarde dan men uit de intensiteit hiervan berekent. Dit is niet steeds geheel verklaarbaar. Men kan de achtergrond verkleinen door het tellervolume klein te maken; voor sommige metingen kan dit van voordeel zijn, voor andere niet daar dan ook het aantal opgevangen deeltjes daalt. Verder kan men de teller door een loodmantel afschermen; het preparaat wordt dan binnen deze mantel geplaatst.

Uit fig. 4 blijkt, dat voor grote bestralingsintensiteiten een vermindering van het rendement optreedt. Dit is het gevolg van het feit dat de Geiger-Müller-teller een eindige onwerkzame tijd bezit, en daardoor een beperkt scheidend vermogen. Onder de onwerkzame tijd verstaan wij de tijd die verloopt na het begin van een ontlading, totdat de telbuis weer in staat is opnieuw op een invallend deeltje te reageren. De onwerkzame tijd bestaat uit twee gedeelten, nl. de ontladingstijd, gedurende welke de ontlading plaats heeft, en de hersteltijd. De laatste is daaraan te wijten dat het na het doven van de ontlading enige tijd duurt voordat de langzaam bewegende positieve gasionen aan de kathode zijn aangekomen. Zij beïnvloeden gedurende die tijd het veld zodanig, dat de ionisatie veroorzaakt door een nieuw aankomend deeltje niet in staat is een nieuwe ontlading te bewerkstelligen. Eerst als de gasionen de kathode binnen een zekere afstand genaderd zijn, wordt de teller weer gevoelig, hoewel de spanningstoot die op dat ogenblik kan worden opgewekt dan nog kleiner is dan vóór de ontlading. Wanneer alle ionen de kathode bereikt hebben, werkt de buis weer normaal. Zowel ontladingstijd als hersteltijd hangen af van de gasvulling, de spanning en de afmetingen van de teller, en van de gebruikte schakeling (drempelwaarde).

Het zal nu duidelijk zijn dat als de bestralingsintensiteit zo groot is dat de invallende deeltjes elkaar gemiddeld opvolgen in een tijd welke van de orde van grootte of kleiner is dan de onwerkzame tijd, deze deeltjes niet meer elk een impuls zullen veroorzaken. Het rendement daalt dus als de gemiddelde deeltjesfrequentie van de orde van de reciproke onwerkzame tijd wordt. Anders gezegd: Het eindige scheidende vermogen van de telbuis stelt een grens aan de waarneembaarheid van grote bestralingsintensiteiten [3]).

Uit het bovenstaande blijkt duidelijk dat het van belang is de onwerkzame tijd zo kort mogelijk te maken. In de practijk is de onwerkzame tijd bij de meeste tellers van de orde van enkele tiende milliseconden.

De gasvulling van een Geiger-Müller-teller

Zoals reeds werd aangestipt, moet er naar worden gestreefd de aard en de druk van het gas in een Geiger-Müller-teller zodanig te kiezen, dat de zelfstandige ontlading die na het binnentreden van een deeltje optreedt na korte tijd afbreekt, al dan niet mede door invloed van een bepaalde schakeling.

Statistisch dovende tellers

Oorspronkelijk werden als vulling voor een Geiger-Müller-buis gebruikt gassen als waterstof, stikstof en lucht, eventueel gemengd met een edelgas [4]).

Na de ontsteking ontwikkelt zich in een teller die gevuld is met dit soort gassen een stationnair brandende gasontlading. Door met een grote weerstand de stroom door de buis te begrenzen tot kleine waarden, kan men bereiken dat deze ontlading na zekere tijd uit zichzelf dooft. Wegens de zeer kleine doorgelaten stroom is namelijk het aantal deeltjes dat aan de ontlading deelneemt zo gering, dat de statistische fluctuaties ervan groot genoeg zijn om de ontlading geheel te onderbreken (vgl. *fig. 5*). Met ziet dit in als men het mechanisme beschouwt waardoor bij lage drukken de ontlading in stand wordt gehouden. Een electron dat tussen de electroden gevormd is maakt op zijn weg naar de anode een aantal ionen en electronen vrij; de zo gevormde electronen doen op hun beurt

[3]) Ook bij kleine bestralingsintensiteiten kan het voorkomen dat twee deeltjes elkaar opvolgen in een tijd kleiner dan de onwerkzame tijd. De daling van het rendement bij kleine bestralingsintensiteiten is echter in de practijk meestal te verwaarlozen.

[4]) Zie bijv. A. Bouwers en F. A. Heyn, Een eenvoudig toestel voor het tellen van electronen, Philips techn. T. **6**, 74-79, 1941.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

hetzelfde. Bovendien wordt een aantal stralingsquanta gevormd. Indien deze ionen en quanta juist weer één electron uit de kathode vrijmaken, kan de ontlading blijven bestaan. Als echter het statistisch fluctuerende aantal deeltjes in een van deze processen beneden een bepaalde grens daalt, is de opeenvolging verstoord en dooft de ontlading.

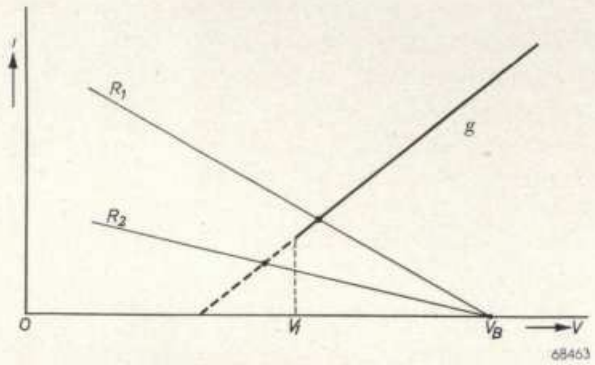


Fig. 5 Uitgezet is de stroom i door een statistisch dovende Geiger-Müller-telbuis tegen de buisspanning V, (stroom-spanning-karakteristiek, lijn g). In serie met de buis is een weerstand geschakeld. De spanning op de telbuis gedurende een ontlading stelt zich bij gegeven serieweerstand R in op de waarde die overeenkomt met het snijpunt van de lijn g met de „weerstandslijn" die bij de waarde R behoort. Deze lijn snijdt de abscis in het punt V_B, overeenkomend met de voedingspanning, de helling van de lijn is omgekeerd evenredig met de weerstand. Voor een weerstand (R_2), groter dan een bepaalde waarde, ligt het snijpunt op het gestippelde gedeelte van de karakteristiek (buisspanning $< V_i$); de ontlading is dan instabiel, en breekt na korte tijd af. Voor kleinere weerstanden (R_1) is de ontlading stabiel.

Het blijkt dan ook dat de tijdsduur van de ontlading zelf statistische fluctuaties vertoont. *Fig. 6* geeft hiervan een voorbeeld. De ontladingstroom in een argon-waterstofteller is daar weergegeven als functie van de tijd, en wel zijn een aantal opeenvolgende ontladingen, circa 100, zichtbaar gemaakt op het scherm van een kathodestraaloscillograaf en op één foto opgenomen. De fluctuaties in de ontladingsduur zijn duidelijk waarneembaar. De beide foto's, die gemaakt zijn voor gemiddelde stroomsterkten tijdens de ontlading die ongeveer een factor 3 verschillen, geven een indruk van het verband tussen de gemiddelde ontladingsduur en de gemiddelde stroom. Om deze gemiddelde waarde van de ontladingsduur, die een deel van de onwerkzame tijd van de teller vormt, klein te houden, is het noodzakelijk de stroom klein, dus de weerstand in de voedingskring groot te maken: ca 10^{10} Ω. Dit heeft echter het bezwaar dat na afloop van de ontlading de oorspronkelijke spanning over de teller zich slechts langzaam herstelt, waardoor de hersteltijd, en dus de onwerkzame tijd, weer groter wordt. Dit effect is te verminderen door in plaats van een eenvoudige weerstand een circuit met electronenbuizen toe te passen, waarbij een voorschakelweerstand van ca 10^6 Ω in plaats van 10^9 tot 10^{10} Ω gebruikt kan worden. (Bijv. een Neher-Harper of Neher-Pickering-schakeling; vgl. het in [4]) geciteerde artikel.)

De beschreven telbuizen noemt men niet-zelfdovende tellers, hetgeen in principe niet juist is: de tellers doven wel zelf, doch langzaam en met veranderlijke duur. Men spreekt daarom ook wel van langzame tellers. Het spanningsgebied waarin deze tellers werken loopt ongeveer van 900 V tot 1500 V. Een voorbeeld van deze tellers vormen de Philips-tellers voor γ-stralen type 18500 en 18501, gemaakt van chroomijzer met een wanddikte van resp. 0,3 en 0,1 mm. Het type 18501 is ook voor harde β-straling bruikbaar. De onwerkzame tijd van deze tellers (in bijbehorende schakeling) is omstreeks 10^{-4} sec. De levensduur is onbeperkt, de achtergrond bedraagt voor de onafgeschermde buis minder dan 20 impulsen per minuut.

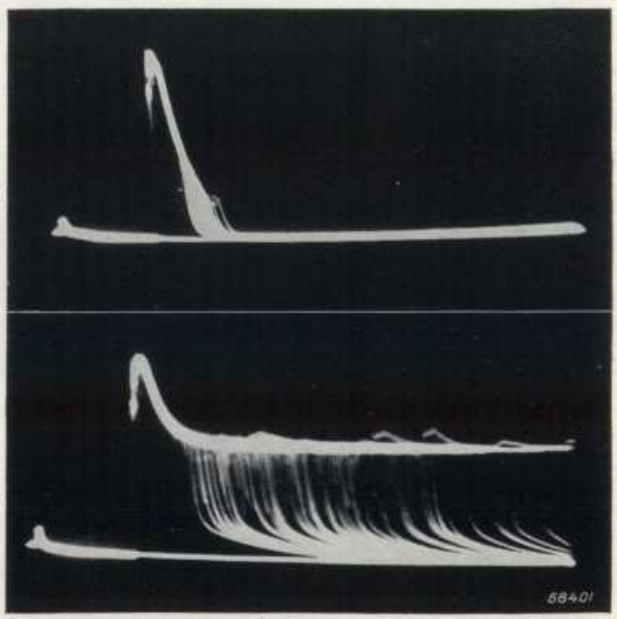


Fig. 6. Stroom door de buis als functie van de tijd bij een statistisch dovende teller, gevuld met argon en waterstof. De foto toont ca 100 registraties. Het begin van ontlading ligt steeds bij de piek links. De duur van de ontlading vertoont grote statistische fluctuaties. De gemiddelde ontladingsduur hangt af van de stroom door de buis. De stroomsterkte na de doorslag bedraagt in *a*) 0,12 μA, in *b*) 0,35 μA. De spanning in de buiskring is 870 V, de totale duur van de tijdbasis is 1,75 msec.

Door ruimtelading dovende tellers

Er bestaat een ander type tellers, de zg. zelfdovende tellers, dat met een niet zeer grote weerstand in serie spontaan dooft in een vrijwel constante en korte tijd. Deze tellers worden daarom ook wel, en beter, snelle tellers genoemd. Hun

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

eigenschappen hebben zij te danken aan de aanwezigheid van bepaalde bijmengsels in het gas waarmee ze gevuld zijn.

In 1937 ontdekte Trost, dat het toevoegen van alcoholdamp (ethanol) aan de argonvulling van een telbuis deze reeds zelfdovend maakt indien in de voedingskring een slechts geringe weerstand is opgenomen. Ook andere organische gassen bleken als „doofgassen" bruikbaar, o.a. methaan, amylacetaat, methyleenbromide en tetramethyllood.

De spanning waarbij deze tellers werken ligt, evenals bij de langzame tellers, bij ca 1000 V of hoger, hun onwerkzame tijd is ongeveer 10^{-4} sec maar nu zonder dat speciale schakelingen toegepast moeten worden.

Algemeen neemt men aan dat in deze tellers, dank zij de aanwezigheid van het doofgas, een zo sterke ionisatie plaats vindt dat na het verdwijnen van de electronen uit de buis (die immers zeer snel naar de dichtbijzijnde anodedraad gelopen zijn) er een grote ruimtelading van positieve ionen overblijft. De veldsterkte nabij de anode daalt hierdoor snel beneden een voor voldoende ionisatie vereiste waarde, en de ontlading dooft. De ontladingstijd is dus klein. Naarmate de ionen zich nu naar de kathode bewegen, herstelt zich het veld aan de draad en wordt de teller weer geleidelijk gevoelig voor nieuwe deeltjes.

Indien de ionen een voldoend aantal nieuwe deeltjes uit de kathode zouden vrijmaken, zou een herontsteking van de telbuis kunnen plaats hebben. De aanwezigheid van het doofgas blijkt dit verschijnsel te kunnen verhinderen. Een groot bezwaar van deze tellers met organische gassen is echter hun eindige en nogal geringe levensduur en hun wisselende gevoeligheid gedurende die levensduur. Beide verschijnselen vinden hun oorzaak in de dissociatie van de organische moleculen door botsing met electronen of door de absorptie van straling. Hierbij ontstaan brokstukken van de oorspronkelijke moleculen, die een andere invloed hebben op het doven en ook op de ligging van het plateau van de teller, dan de oorspronkelijke moleculen. Bovendien kunnen ze de eigenschappen van de teller in ongunstige zin beïnvloeden als ze neergeslagen worden op anode of kathode van de teller. Ook de temperatuur (dampspanning van het doofgas) beïnvloedt de werking van de buis. Hierdoor verandert het plateau, dus de instelling en daarmee het rendement van de teller. Met toenemende gebruiksduur ontstaat een grote verscheidenheid van radicalen in de buis, totdat de afbraak zover is voortgeschreden, dat er te veel stoffen met ongunstige eigenschappen (invangen van electronen, bederf van electrodenoppervlakken) gevormd zijn, waardoor de teller onbruikbaar is geworden. Hoe snel dit gebeurt, hangt af van de aard van het doofgas. Bij grote organische moleculen duurt het langer voordat zulke kleine brokstukken zijn ontstaan dat de doofwerking nagenoeg ophoudt dan bij kleine moleculen, zoals die van ethanol. De levensduur is verder afhankelijk van de schakeling waarin de teller wordt gebruikt; is deze zodanig dat een bespoediging van de doving wordt verkregen, dan is de levensduur langer. Het verdient daarom aanbeveling ook bij deze snelle tellers een doofschakeling toe te passen.

De levensduur van een „alcoholteller" is van de orde van 10^7-10^9 tellingen, de achtergrond is, evenals bij statistisch dovende tellers, afhankelijk van de uitvoering, van de orde van 10 à 20 impulsen per minuut.

Halogeentellers

In 1937 adviseerden Geiger en Haxel (Duits patent 682 657) voor de vulling van telbuizen geheel of gedeeltelijk halogenen te gebruiken. Deze tellers zouden zelfdovend zijn en een lange levensduur bezitten. In de daaropvolgende jaren is dit idee verder uitgewerkt, voornamelijk in de Verenigde Staten van Amerika [5]). Het resultaat hiervan is geweest dat zeer bruikbare zelfdovende tellers met onbeperkte levensduur en eventueel een lage werkspanning zijn ontstaan.

Deze zg. halogeentellers bevatten een edelgas, of een mengsel van edelgassen, met een geringe hoeveelheid halogeen als bijmengsel. Het halogeen, waarvoor in aanmerking komen chloor en broom — fluor is te sterk reactief, en bij jodium hangt de dampspanning te zeer van de temperatuur af —, dient als doofgas. Indien in een dergelijke telbuis de halogeenmoleculen tot dissociatie worden gebracht, geeft dit op den duur geen vermindering van de beschikbare hoeveelheid doofgas, daar na enige tijd de brokstukken recombineren tot volledige moleculen. Hierop berusten de nagenoeg onbegrensde levensduur en de constante prestaties van de halogeentellers.

Halogenen zijn stoffen die de materialen van de buis sterker kunnen aantasten dan organische dampen. Door een geschikte keuze van materialen is dit bezwaar te ondervangen; bij het gebruik van halogenen zijn dan ook vele van de gebruikelijke materialen bij de constructie uitgesloten.

---

[5]) S. H. Liebson en H. Friedman, Rev. sci. Instr. **19**, 303, 1948; S. H. Liebson, Rev. sci. Instr. **20**, 483, 1949.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Zoals bij alle zelfdovende tellers is de duur van een ontlading vrijwel niet aan statistische fluctuaties onderhevig en hangt deze ook niet sterk af van de stroom door de buis. In *fig. 7* is dit geïllustreerd. Men vergelijke deze figuur met fig. 6: weer zijn een groot aantal ontladingen (ongeveer 100) op één

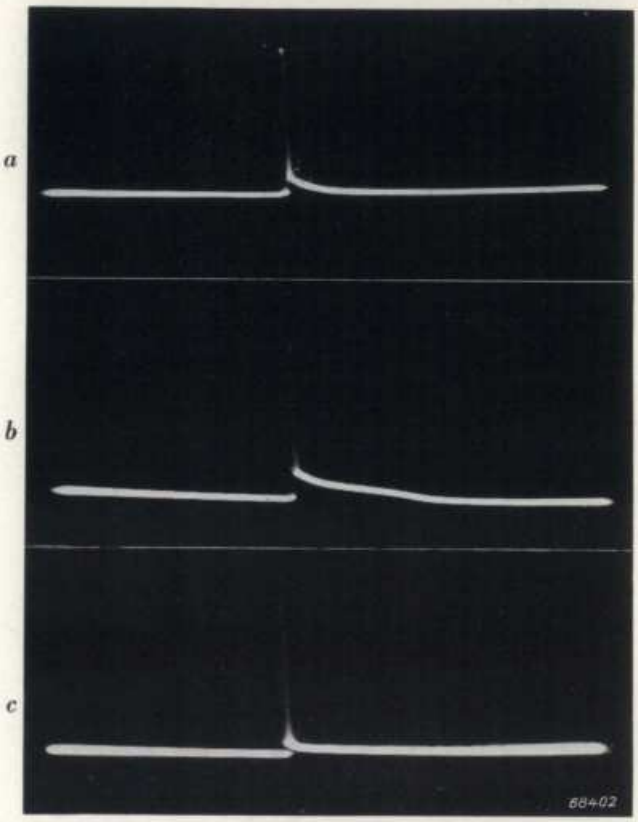


Fig. 7. Als fig. 6, nu voor een door ruimtelading dovende halogeenteller. De voorschakelweerstand is bij *a*) 1000 MΩ, bij *b*) en *c*) 10 MΩ. De voedingspanning is bij *a* en *b*) 350 V, bij *c*) 800 V. Ook hier zijn ca 100 opnamen na elkaar opgenomen. Er is nu geen sprake van statistische fluctuaties in de ontladingsduur. De totale duur van de tijdbasis bedraagt 0,62 msec.

fotografische plaat vastgelegd. Het blijkt dat er ondanks de sterk uiteenlopende voorschakelweerstanden en spanningen nu nagenoeg geen variatie in de gemiddelde ontladingsduur voorkomt en dat eveneens onder deze wisselende omstandigheden de individuele impulsen gelijk van grootte zijn. Ook indien men een zo kleine voorschakelweerstand gebruikt dat de neiging tot het vormen van een continue ontlading groot wordt (vgl. fig. 5), heeft de impuls toch nog steeds dezelfde duur. Hier vindt men in het geheel geen geleidelijke overgang van steeds langer durende impulsen naar een continue ontlading, zoals bij de statistisch dovende tellers gebleken is het geval te zijn, als men de weerstand in de kathodeleiding verkleint.

Laagspanningstellers

Tot voor kort was de spanning op een normale telbuis gewoonlijk van de orde van 1000 V. Het gebruik van een lagere werkspanning zou in vele gevallen de voorkeur verdienen, nl. daar waar een batterij als voedingsbron dient. Ook is het in sommige schakelingen van voordeel, als de spanning op de telbuis niet groter is dan die op de in de schakeling gebruikte radiobuizen. Men kan natuurlijk door verandering van de druk in de teller enige verlaging van de doorslagspanning bewerkstelligen; door deze wijze van doen gaat echter in het algemeen de gevoeligheid achteruit.

Reeds lange tijd geleden is de grote invloed aangetoond van de aanwezigheid van bepaalde bijmengsels op de doorslagspanning van een gas [6]). Het bleek dat men een verlaging van de doorslagspanning kan verwachten, indien de atomen van het vulgas een metastabiele aangeslagen toestand bezitten waarvan de energie ligt boven de ionisatie-energie van de bijmengsels. De metastabiele atomen van het vulgas kunnen dan naar een lagere toestand terugkeren door afgifte van hun aanslagenergie aan de vreemde atomen, waardoor deze geïoniseerd worden. Men verkrijgt dus bij dezelfde buisspanning meer ionen dan zonder bijmengsels, en de doorslagspanning is lager. Zo heeft bijv. neon met 0,1% argon voor vlakke evenwijdige ijzeren electroden een minimale doorslagspanning van ca 165 V, terwijl zuiver neon een doorslagspanning van 450 V bezit bij dezelfde omstandigheden.

Men zou er nu aan kunnen denken dit mengsel als telbuisvulling te gebruiken, teneinde een teller te construeren die een lage startspanning voor een zelfstandige ontlading bezit. Om echter te verhinderen dat de positieve argon- of neonionen en de eventueel overblijvende langzame (niet door het veld beïnvloede) metastabiele neonatomen herontstekingen veroorzaken, is het nodig dat in dit geval gedurende lange tijd na een ontsteking de spanning een lage waarde bezit, waardoor de teller zeer langzaam wordt, en een speciale doofschakeling vereist is. (Een dergelijke schakeling is inderdaad toegepast door Simpson.) Wordt echter aan het mengsel nog een weinig halogeen als doofgas toegevoegd, dan dooft de teller uit zichzelf in een korte tijd. Door deze toevoeging stijgt de doorslagspanning wel enigszins, doch daar de voor het doven benodigde hoeveelheid

[6]) Zie bijv. M. J. Druyvesteyn en F. M. Penning, Rev. mod. Phys. **12**, 87-174, 1940.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

halogeen slechts zeer gering is, kan op deze wijze een zelfdovende teller met een ontsteekspanning van 250 V worden gemaakt, bij een normale druk (ca 10 cm kwik). Ook de halogeenionen zelf kunnen als opnemers van de metastabiele aanslagenergie fungeren (neon-broom-mengsels), doch dan ligt de doorslagspanning vaak wel wat hoger dan wanneer er ook argon toegevoegd is.

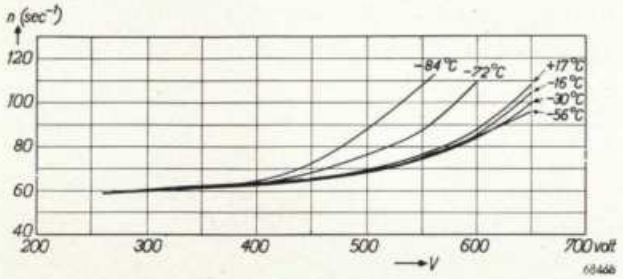


Fig. 8. Plateau van de telkarakteristiek van een laagspanningshalogeenteller bij verschillende temperaturen.

Voor sommige toepassingen van de laagspanningstellers wordt geëist dat de telkarakteristiek ongevoelig is voor relatief grote temperatuurvariaties. In *fig. 8* ziet men het plateau van de telkarakteristiek van een laagspannings-halogeenteller, gemeten bij een aantal verschillende temperaturen, in de niet dovende schakeling van *fig. 9*. Uit figuur 8 blijkt dat de invloed van de temperatuur tussen ca −60 ° en +17 °C te verwaarlozen is. De lengte van het plateau bedraagt 250 V, en de helling minder dan 5% per 100 V. Ook bij hogere temperaturen, tot 100 °C bijv., blijft het plateau nagenoeg ongewijzigd. De verkorting van het plateau bij temperaturen beneden −70 °C is te wijten aan het condenseren van broom uit de gasvulling.

De levensduur van halogeen-laagspanningstellers is nagenoeg onbeperkt, meer dan 10^{11} tellingen zijn in levensduurproeven bereikt. De achtergrond bedraagt in laagspanningstellers met ongeveer dezelfde afmetingen als de tellers type 18500 en 18501 ca 25 impulsen per minuut als ze onafgeschermd zijn, en bij bescherming door een laag lood van 5 cm dikte 14 impulsen per minuut.

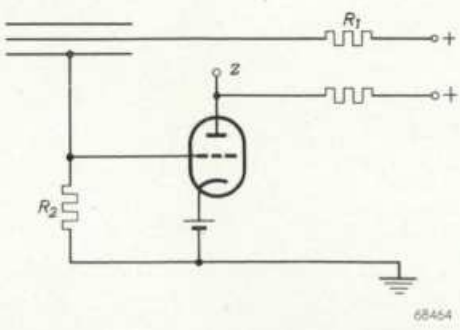


Fig. 9. Schakeling waarmede de in dit artikel weergegeven plateau's zijn gemeten. $R_1 = R_2 = 5$ MΩ. De impulsen worden afgenomen bij *z*.

Men moet bij gebruik van halogeentellers in een van de normale doofschakelingen er rekening mee houden dat de capaciteit die parallel aan de teller staat soms van invloed kan zijn op de doving.

Tellers met een organische damp als doofgas kunnen slechts ontladingstromen van enkele μA verdragen. Halogeentellers daarentegen kunnen in schakelingen worden gebruikt waarbij de stroom door de teller een gemiddelde waarde van 100 tot 200 μA heeft. (Halogeentellers kunnen zelfs nagenoeg zonder nadelige invloed een glimontlading verdragen, waarbij continu nog grotere stroomsterkten optreden.) Zo'n schakeling wordt vaak in draagbare telapparaten toegepast, en is in *fig. 10* in principe weergegeven. Een direct aanwijzende meter wordt voor grote intensiteiten gebruikt, een hoofdtelefoon voor geringere. Op deze wijze kan men bijv. zeer eenvoudig sterke γ- of röntgenstralingen meten, van tientallen röntgen per uur. Men gebruikt in zulke gevallen vaak tellers met opzettelijk verminderde gevoeligheid; zie aan het slot van dit artikel.

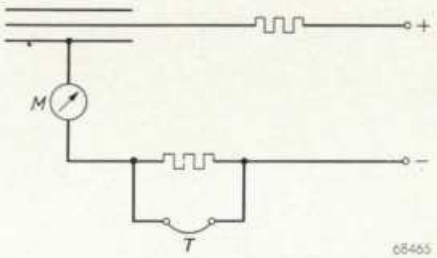


Fig. 10. Eenvoudige schakeling voor het meten met halogeentellers. *M* microampèremeter, bijv. 0-250 μA, *T* hoofdtelefoon.

Bespreking van enkele tellers

Wij hebben gezien dat de constructie van Geiger-Müller-tellers voor uiteenlopende doeleinden allerlei problemen met zich meebrengt: materialen van wand en anodedraad, samenstelling en dikte van het venster, afmetingen en gasvulling zijn voor de diverse toepassingen aan steeds andere eisen onderhevig. In dit artikel zullen wij nu op deze problemen niet verder ingaan; wel willen wij nog enkele prototypen van nieuwe door Philips vervaardigde tellers de revue laten passeren.

In *fig. 11* is een aantal halogeentellers afgebeeld. De teller (*a*) voor β- en γ-stralen, die bij ca 1000 V werkt, een binnendiameter van 30 mm en een mica venster van 10 μ bezit, heeft een zeer lang en vlak plateau (lengte ca 700 V, helling 3% per 100 V). In *fig. 12* is de telkarakteristiek van deze buis weergegeven, gemeten in de eenvoudige schakeling van fig. 9. De achtergrond bedraagt 50 impulsen per minuut, als de teller onafgeschermd is. Een kleinere uitvoering (*b*), met diameter 15 mm

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

en een venster van 5 μ dik, is speciaal geschikt voor het meten van zeer zachte β-straling en heeft een achtergrond van 18 tot 20 impulsen/min. Deze beide tellers, die zijn ontworpen voor het tellen

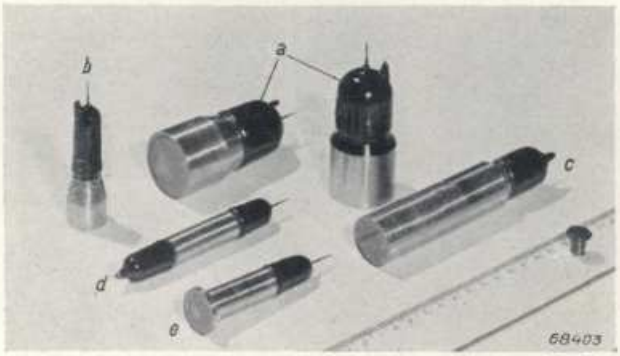


Fig. 11. Enkele typen van halogeentellers: *a*) Teller voor β- en γ-stralen, 30 mm inwendige diameter met mica venster 10 μ dik. *b*) Zelfde teller in kleinere uitvoering, 15 mm inwendige diameter, mica venster 5 μ dik. *c*) Röntgenstralenteller, met inwendige diameter van 19 mm en mica venster van 10-12,5 μ. *d*) en *e*) Laagspannings β- en γ-stralentellers, inwendige diameter 14 mm, resp. zonder en met mica venster (dikte 5 tot 10 μ).

van β-deeltjes, hebben bovendien nog een rendement voor γ-stralen van ongeveer 2%. Zij kunnen, door een andere gasvulling, ook een werkspanning van omstreeks 600 V krijgen, waarbij het rendement voor γ-stralen wat afneemt.

De buis (*c*) is bestemd voor het gebruik in een röntgendiffractie-apparaat[2]). Ze is speciaal geschikt voor het meten van de Kα straling van koper (ca 1,5 Å); de gasvulling is voor deze golflengte goed absorberend. De in het aangehaalde artikel beschreven telbuis bevatte methyleenbromide als doofgas. Wordt de buis vervangen door de halogeenteller (*c*) uit fig. 11 van dezelfde werkspanning, zoals inderdaad is geschied in een nieuwe versie van het toestel, dan wordt een winst van een factor 2,5 in de gevoeligheid behaald. Dit komt

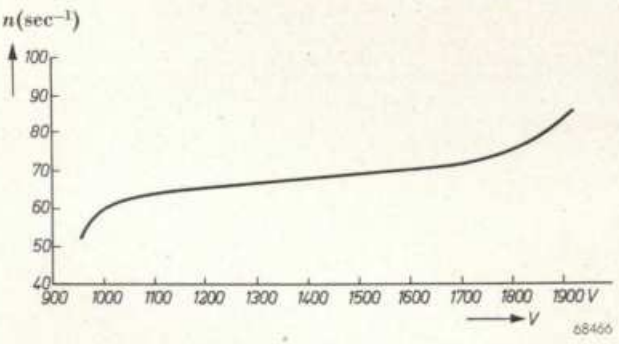


Fig. 12. Plateau van de β- en γ-stralenteller *a* uit fig. 11. Helling 3% per 100 V, lengte ca 700 V. De achtergrond van deze teller, indien afgeschermd door 5 cm lood, bedraagt 25 tot 30 impulsen per minuut.

doordat de vrij grote hoeveelheid methyleenbromide die in de oude buis voor het doven nodig is vele van de gevormde electronen wegvangt, waardoor het gevoelige volume van de teller beperkt wordt tot een nauw gebied om de anodedraad. De veel kleinere benodigde hoeveelheid halogeen vangt in zoveel geringere mate electronen weg dat nu nagenoeg het gehele tellervolume gevoelig is. Bovendien is in het laatste geval een nog wat hogere vuldruk mogelijk, hetgeen voor de absorptie van de röntgenquanta gunstig is, en dus eveneens het rendement verbetert. Het plateau van de teller heeft een helling van 3% per 100 V en strekt zich uit van 1300 V tot voorbij 2000 V (*fig. 13*). Het mica venster van 12 μ kan eventueel worden vervangen door een dunner, tot 5 μ. De hierdoor verkregen grotere gevoeligheid is vooral van belang voor metingen met de zachtere chroomstraling. De achtergrond bedraagt 50 impulsen per minuut.

De buis (*d*) is een laagspanningsteller voor γ- en harde β-stralen, (*e*) is een dergelijke buis met mica venster, voor zachtere stralingen.

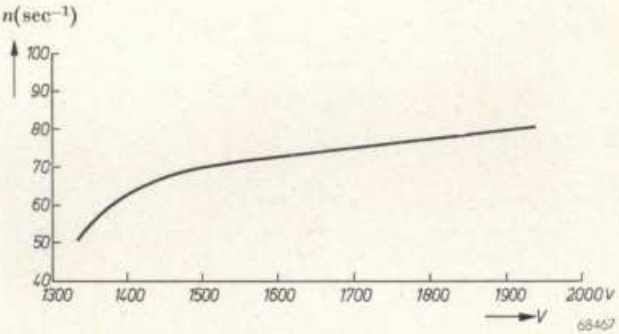


Fig. 13. Plateau van de röntgenstralenteller *c* uit fig. 11. Dit strekt zich uit tot boven 2000 V en heeft een helling van ruim 3% per 100 V. De achtergrond bedraagt 50 impulsen per minuut.

Voor sommige toepassingen is het nuttig een ongevoelige teller te bezitten, bijv. als men een zeer grote stralenintensiteit wenst te meten, waarbij het oplossend vermogen van de normale tellers wordt overschreden. Het ongevoelig maken door de teller bijna volledig af te schermen met een laag lood, is niet goed doenlijk voor harde γ-stralen, en bovendien voor draagbare tellers zeer onpractisch. Daarom zijn naar het voorbeeld van teller (*d*) van fig. 11 twee γ-stralen-tellers ontwikkeld, die tezamen met deze (*a*) in *fig. 14* zijn afgebeeld. Een van deze tellers (*b*) is 20 maal, de ander (*c*) 200 maal minder gevoelig dan de oorspronkelijke teller (*a*). Zij werken beide ook op betrekkelijk lage spanning, en hebben een met

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

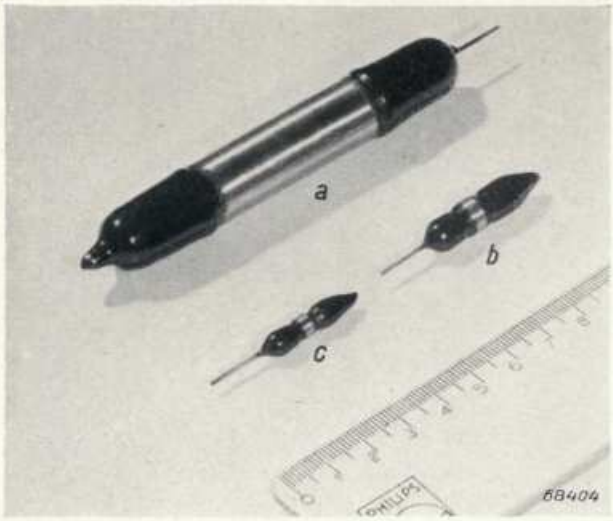


Fig. 14. Ongevoelige tellers voor γ-stralen. *a*) De reeds besproken teller *d* uit fig. 11, *b*) een teller die 20 maal, *c*) een teller die 200 maal minder gevoelig is dan deze.

hun afmetingen overeenkomende kleine achtergrond.

Samenvatting. De historische ontwikkeling van de Geiger-Müller-telbuis vanaf zijn eerste vorm tot aan de tegenwoordige uitvoering wordt aan de hand van de eigenschappen van gasontladingen besproken, en de verschillende manieren waarop men een gasontladingsbuis voor het tellen van ioniserende deeltjes of quanta kan gebruiken worden kort aangeduid. In het bijzonder worden de eigenschappen van de telbuizen in het „Geiger-Müller-gebied" (plateau) en de gebruikelijke indeling van de bestaande tellers in statistisch dovende en door ruimtelading dovende buizen beschouwd. Op de eigenschappen van de argon-waterstof-teller, die een voorbeeld is van een statistisch dovende, en op die van de teller met een organische damp als doofmiddel, die een voorbeeld is van een door ruimtelading dovende teller, wordt nader ingegaan. Ten slotte worden de nieuwe zelfdovende tellers met halogeen als doofgas in hun diverse uitvoeringsvormen en toepassingen beschreven. Hierbij komen ter sprake o.a. een zg. laagspanningsteller, die een startspanning van 250 volt heeft, enige typen van β- en γ-stralentellers met mica venster, en een teller met grote gevoeligheid voor röntgenstralen in het golflengtegebied van ongeveer 1 tot 2 Å. De levensduur van deze tellers is vrijwel onbeperkt.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

DE STRUCTUUR VAN GLAS

door J. M. STEVELS.

666.1:539.213.1

Hoewel het materiaal „glas" reeds enige duizenden jaren bekend is, blijken de variatiemogelijkheden van dit materiaal nog geenszins uitgeput te zijn. Dit is gedurende de laatste decennia gebleken, waarin men talloze glassoorten met nieuwe eigenschappen heeft ontwikkeld, die in allerlei takken van de techniek toepassing hebben gevonden. De man van wetenschap kan hierbij met voldoening constateren dat, na een eeuwenlange heerschappij van de empirie op dit gebied, thans in vele gevallen het theoretisch inzicht omtrent de structuur van het glas als leidraad dient in de ontwikkeling.

Inleiding

Voor tal van toepassingen van glas, vooral op electrotechnisch gebied, worden tegenwoordig eisen gesteld die ver uitgaan boven de eigenschappen die men bij normale glassoorten gewend is aan te treffen. Om dit te illustreren, behoeven wij slechts enkele grepen te doen uit het arbeidsgebied van onze laboratoria. Voor radar-zendbuizen moet men kunnen beschikken over een soort glas die in een electrisch wisselveld met frequenties van de orde van 10^{10} Hz (3 cm-golven) nog geen overmatige diëlectrische verliezen vertoont. Bij normale omroepzendbuizen, die bij frequenties in de buurt van 10^6 Hz (300 m) werken, mag het glas uit de aard der zaak eveneens niet teveel diëlectrische verliezen vertonen, maar voor dit geval is daaraan de voorwaarde gekoppeld van een lage verwekingstemperatuur, teneinde de fabricage eenvoudig te maken. Op het gebied van de televisie is het vooral de ontwikkeling der kathodestraalbuizen in de ontvangers die speciale glasproblemen meebracht. Zo heeft men voor de kleine buizen voor projectie-televisie, waarin electronen door spanningen van 25 kilovolt of nog hoger worden versneld, een glassoort nodig die zonder te verkleuren een langdurig bombardement door deze electronen en door röntgenstralen kan uithouden.

Het is een gelukkige omstandigheid geweest dat men op het moment dat dergelijke zeer speciale eisen aan de glastechnoloog werden voorgelegd, enigermate een inzicht had in de structuur van glas in het algemeen. Het was daardoor mogelijk, wegen uit te stippelen waarlangs men het gewenste resultaat kon verwachten te bereiken.

De grondslag van onze hedendaagse kennis van de structuur van glas is gelegd door Zachariasen[1]), die in 1932 een inmiddels klassiek geworden artikel hieraan wijdde. Wij hebben deze inzichten reeds eerder in dit tijdschrift uiteengezet [2]), zodat wij thans ermee willen volstaan, hen op summiere wijze weer te geven. Wij zullen vervolgens ingaan op de verfijningen die de theorie van Zachariasen naderhand op verschillende punten heeft ondergaan en die in hoofdzaak zijn te danken aan Warren en Weyl in de Verenigde Staten en aan Dietzel en Smekal in Duitsland. Vooral dank zij deze verfijningen kan men niet alleen een aantal bijzonderheden van de reeds bekende physische eigenschappen van glas begrijpen, maar kan men ook beter voorbereid dan voorheen de nieuwe eisen der techniek tegemoet treden.

De theorie van Zachariasen

Er zijn een aantal oxyden, de zogenaamde glasvormende oxyden, die zowel in de glasachtige als in de kristallijne toestand kunnen voorkomen (SiO_2, B_2O_3, P_2O_5). Volgens Zachariasen zijn deze oxyden in de kristallijne en in de glasachtige toestand opgebouwd uit dezelfde bouwstenen, nl. polyeders (tetraëders of driehoeken) van zuurstofionen, in welker centrum zich de hooggeladen kationen Si^{4+}, B^{3+}, P^{5+} bevinden. Het enige verschil is, dat in de kristallijne toestand deze polyeders regelmatig gerangschikt zijn, terwijl dit in de glasachtige toestand niet het geval is. Een schematische voorstelling hiervan geeft *fig. 1*.

Opdat het bouwwerk van zuurstofpolyeders in deze twee vormen kan voorkomen, is het nodig dat de structuur van het desbetreffende oxyde in de kristallijne toestand aan een aantal voorwaarden voldoet, die indertijd door Zachariasen zijn aangegeven. De voorwaarden van Zachariasen luiden als volgt (zie het in noot [2]) aangehaalde artikel):

1) Ieder zuurstofion moet gebonden zijn aan niet meer dan twee positieve ionen, die hoog geladen en klein moeten zijn.
2) Het aantal zuurstofionen die zulk een positief ion omgeven (een polyeder vormen), mag niet te groot en niet te klein zijn (3 of 4).

[1]) W. H. Zachariasen, J. Amer. Chem. Soc. **54**, 3841, 1932.
[2]) J. M. Stevels, Philips techn. T. **8**, 231, 1946.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

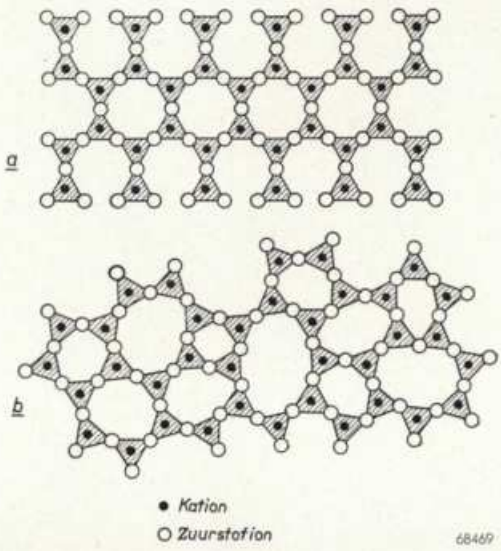


Fig. 1. Schematische tweedimensionale voorstelling, *a*) van een kristallijn rooster A_2O_3 (A is een kation) en *b*) van het overeenkomstige netwerk in de glasachtige toestand.

3) De aan elkaar grenzende zuurstofpolyeders moeten gemeenschappelijke hoekpunten („brug"-zuurstofionen), maar mogen geen gemeenschappelijke ribben of zijden hebben.
4) Iedere polyeder moet op zijn minst drie zuurstofionen met naburige polyeders gemeen hebben.

Op de motivering van deze voorwaarden zullen wij hier niet meer ingaan. Het zij genoeg op te merken dat oxyden die in de kristallijne toestand hieraan voldoen, eo ipso een zeer ijle structuur hebben, die het mogelijk maakt dat de polyeders zich met enige speling aan elkaar kunnen leggen, zodat zij zich niet noodzakelijkerwijze volgens een periodiek patroon rangschikken wanneer bij afkoelen uit de smelt de vaste phase wordt gevormd.

De structuur van de vele glazen die men kan bereiden door het samensmelten van deze glasvormende oxyden met een groot aantal metaaloxyden, zoals CaO, BaO, PbO, Na_2O, wordt eveneens door de theorie van Zachariasen beschreven. Terwijl de metaalionen een plaats vinden in de gaten van het zojuist beschreven ijle netwerk, worden de extra toegevoegde zuurstofionen opgenomen doordat een aantal zuurstofbruggen in het netwerk verbroken worden, waarbij ieder brug-zuurstofion vervangen wordt door twee zuurstofionen die geen brug vormen (zg. zwevende zuurstofionen). Het zal duidelijk zijn, dat een voortgezette verandering van deze soort van grote invloed zal zijn op de eigenschappen van het glas.

In *fig. 2* ziet men een schematische voorstelling van de structuur van zulk een glas.

In feite is het natuurlijk niet zo, dat elk metaalion zich een plaats zoekt in een gat in het netwerk. Men kan beter zeggen, dat tijdens het vastworden van de smelt de zuurstofketens zich leggen om de metaalionen. Door hun aanwezigheid beïnvloeden deze laatste dus enigszins de vorm die het netwerk aanneemt en om deze reden hebben zij dan ook de naam gekregen van netwerkwijzigende ionen (Engels: network-modifiers). De ionen daarentegen die in de centra der zuurstofpolyeders voorkomen en die dus eigenlijk met de zuurstofionen het netwerk vormen, noemt men de netwerkvormende ionen (network-formers).

Deze simpele theorie van de structuur der glazen is, in hoofdzaak door Warren en zijn medewerkers[3]), omstreeks 1938 met behulp van röntgendiffractieopnamen bevestigd.

Wij willen nu een aantal van de reeds vermelde verfijningen bespreken, die in de laatste tien jaar in de theorie zijn aangebracht.

De structuur der boraatglazen

Het zal duidelijk zijn dat het toevoegen van metaaloxyden aan een glasvormend oxyde niet willekeurig ver kan worden doorgezet. Wij hebben er immers reeds op gewezen dat het afbreken van zuurstofbruggen van grote invloed is op de eigenschappen van een glas, en men kan aanvoelen dat bij afbraak van àl te veel zuurstof-

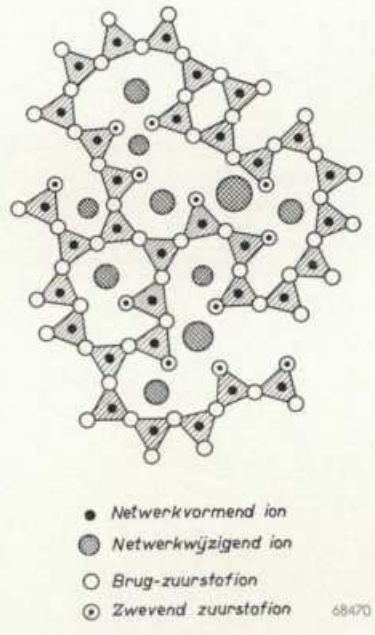


Fig. 2. Schematische tweedimensionale voorstelling van het netwerk van een glas dat naast zuurstofionen zowel netwerkvormende als verschillende netwerkwijzigende ionen bevat. Er treden zwevende zuurstofionen op.

[3]) B. E. Warren en J. Biscoe, J. Amer. Ceram. Soc. **18**, 49, 1935; J. Biscoe en B. E. Warren, J. Amer. Ceram. Soc. **21**, 287, 1938.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

bruggen de typische glasstructuur van samenhangende tetraëders of driehoeken ten slotte onbestaanbaar wordt. Men kan gemakkelijk inzien dat een netwerk met volledige ruimtelijke samenhang niet meer te realiseren is zodra het gemiddelde aantal contactpunten (brugzuurstofionen) per polyeder, dat men als y aanduidt, kleiner dan 2 wordt [4]). Er vormen zich dan „eilanden", die op zichzelf nog wel uit een vrij groot aantal polyeders kunnen bestaan. Naarmate y kleiner wordt, worden de eilanden ook kleiner. Voor $y = 1$ heeft men te maken met eilandjes van gemiddeld twee polyeders, terwijl, zoals vanzelf spreekt, voor $y = 0$ de „structuur" bestaat uit geïsoleerde polyeders. Het zal duidelijk zijn dat de structuren met kleine waarden van y een zeer sterke neiging zullen hebben zich te ordenen, met andere woorden: zij gaan gemakkelijk in de kristallijne toestand over.

Het aantal contactpunten per polyeder y kan heel eenvoudig uit de samenstelling van het glas worden berekend. De samenstelling wordt in dit verband gekenmerkt door de verhouding R van het totale aantal zuurstofionen tot het totale aantal netwerkvormende ionen. Voor glazen met tetraëders als bouwstenen, dwz. met een omringingsgetal 4 van de netwerkvormende ionen (silicaat- en phosphaatglazen), geldt [5]):

$$y = 8 - 2R\,, \quad \ldots\ldots \quad (1)$$

voor glazen met driehoeken als bouwstenen, dwz. met omringingsgetal 3, geldt:

$$y = 6 - 2R \quad \ldots\ldots \quad (2)$$

Inderdaad blijkt dat silicaatglazen uitsluitend gevormd kunnen worden zolang $R \leqq 3$; met andere woorden, zodra $y < 2$ wordt (d.i. zodra eilandvorming begint op te treden), is het vermogen van de smelt om in de glasachtige toestand te stollen niet meer aanwezig. Bij de phosphaatglazen blijkt men met het toevoegen van metaaloxyden iets verder te kunnen gaan, nl. tot $R = 3{,}2$. Dan is $y = 1{,}6$; de glasachtige toestand kan hier dus blijkbaar nog gerealiseerd worden ondanks het voorkomen van (niet al te kleine) eilanden.

Bij de boraatglazen zou men, aangezien de B_2O_3-structuur uit driehoeken bestaat, verwachten dat de toevoeging van metaaloxyden eilandvorming ($y < 2$) gaat veroorzaken zodra $R > 2$. Bij de boriumhoudende glazen blijkt nu echter een eigenaardige complicatie op te treden, doordat in zulke glazen metaaloxyden kunnen worden opgenomen volgens een mechanisme dat enigszins afwijkt van het hierboven beschrevene. Voegt men aan B_2O_3 metaaloxyden toe, bijv. Na_2O, dan zullen de Na^+-ionen een plaats vinden als netwerkwijzigende ionen, maar het mechanisme van de verbreking van bruggen treedt niet op. De overmaat toegevoegde zuurstof wordt opgenomen doordat het B^{3+}-ion de eigenschap heeft niet alleen te kunnen voorkomen in het zwaartepunt van een zuurstofdriehoek maar ook in het zwaartepunt van een zuurstoftetraëder. Het netwerk wordt dus nu opgebouwd uit zuurstofdriehoeken èn -tetraëders, terwijl er geen enkel zwevend zuurstofion ontstaat. Schematisch is een dergelijke structuur voorgesteld in *fig. 3*.

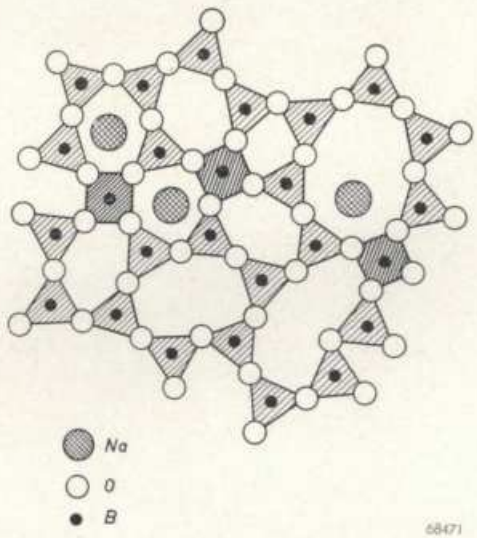


Fig. 3. Schematische tweedimensionale voorstelling van een boraatglas met een gering gehalte aan Na_2O. Dit is daardoor gekenmerkt, dat er geen zwevende zuurstofionen voorkomen. (B^{3+}-ionen met een trigonale resp. tetraëdrische omringing zijn in de figuur voorgesteld met een omringingsgetal 3 resp. 4 in het platte vlak.)

Het merkwaardige is, dat deze wijze van opnemen van zuurstof, waarbij dus een wisseling van het omringingsgetal voor een aantal B^{3+}-ionen optreedt en waarbij het netwerk hoe langer hoe meer aan stevigheid wint, wordt volgehouden tot een zeer bepaalde concentratie is bereikt, bijv. voor het systeem Na_2O-B_2O_3 tot 18 mol.% Na_2O. Bij grotere concentraties van Na_2O gaat het vroeger beschreven mechanisme van verbreking der bruggen alsnog optreden, met andere woorden nu worden er wèl zwevende zuurstofionen gevormd. Men heeft deze gebieden van concentraties respectievelijk het

---

[4]) J. M. Stevels, J. Soc. Glass Techn. **30**, 31, 1946; Ned. T. Natuurkunde **12**, 257, 1946.

[5]) Noemt men nl. het gemiddelde aantal zwevende zuurstofionen per polyeder x en het totale aantal zuurstofionen per polyeder (het omringingsgetal) z, dan is, zoals men door aftellen van de ionen onmiddellijk verifiëren kan: $x + y = z$ en $x + \frac{1}{2}y = R$, waaruit direct volgt: $y = 2z - 2R$.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

accumulatiegebied en het afbraakgebied genoemd.

De hier geschetste gang van zaken brengt mede dat in zulk een boraatglas in verhouding meer metaaloxyden kunnen worden opgenomen alvorens eilandvorming optreedt. In het accumulatiegebied, waarin men geen zwevende zuurstofionen krijgt, is steeds $y = 2R$ (vgl. noot [5])), dus het gemiddelde aantal contactpunten per polyeder neemt hier met toenemende R toe! In het afbraakgebied blijft de verhouding tussen de aantallen driehoeken en tetraëders verder constant, en wel zodanig dat het gemiddelde omringingsgetal van het B^{3+}-ion $z = 3{,}22$ is. In dit gebied geldt derhalve (vgl. noot [5])):

$$y = 6{,}44 - 2R \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (3)$$

Eilandvorming ($y < 2$) zal nu pas optreden zodra $R > 2{,}22$ wordt. In werkelijkheid blijken de meeste

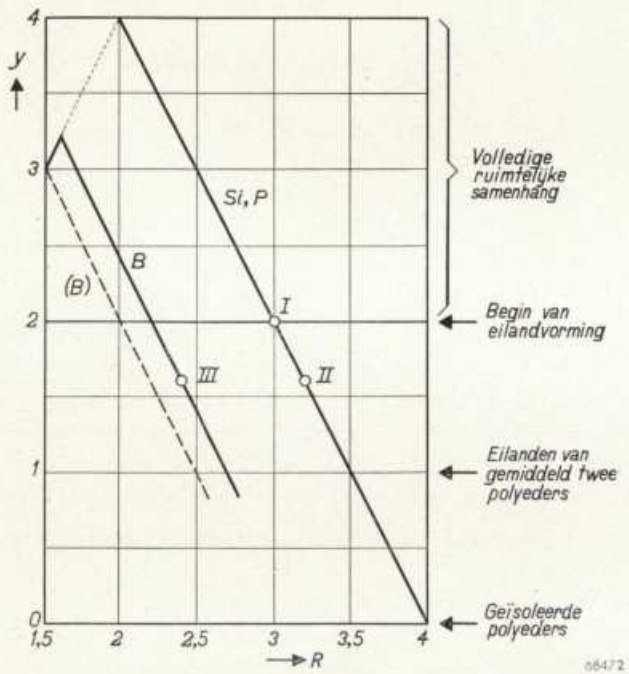


Fig. 4. Verband tussen y, het gemiddelde aantal brugzuurstofionen per polyeder, en R, het totale aantal zuurstofionen gedeeld door het totale aantal glasvormende ionen. R wordt groter naarmate men meer metaaloxyden aan het glasvormende oxyde toevoegt. De getrokken lijn *Si,P* geldt voor een netwerk van tetraëders (verg. 1), de gestippelde lijn (*B*) voor een netwerk van driehoeken (verg. 2).

Van $y = 2$ af treedt eilandvorming op. Bij silicaatglazen geeft dit de grens aan tot welke R mag worden opgevoerd zonder dat ontglazing optreedt (punt *I*). Bij phosphaatglazen blijkt de glasachtige toestand nog bestaanbaar te zijn tot $y = 1{,}6$, dwz. $R = 3{,}2$ (punt *II*).

Bij de boraatglazen gaat het toevoegen van metaaloxyde aanvankelijk gepaard met een overgang van B^{3+}-ionen van omringingsgetal 3 naar omringingsgetal 4; dan is $y = 2R$ (begin van de geknikte, getrokken lijn *B*). Heeft het omringingsgetal de gemiddelde waarde $z = 3{,}22$ bereikt, dan blijft het verder constant en y daalt nu met toenemende R volgens verg. (3). Eilandvorming ($y = 2$) begint nu bij $R = 2{,}22$, maar de glasachtige toestand blijkt bij de meeste boraatglazen nog mogelijk tot $R = 2{,}4$ (punt *III*).

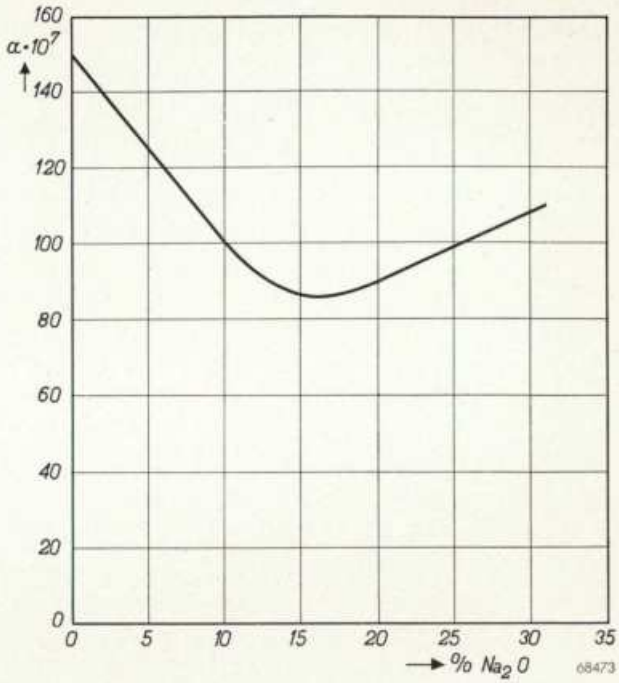


Fig. 5. De uitzettingscoëfficient van zuivere natriumboraatglazen als functie van het gehalte aan Na_2O, uitgedrukt in gewichtsprocenten.

boraten nog glasachtig te kunnen worden tot $R = 2{,}4$; ook hier is dus, evenals bij de phosphaatglazen, een geringe mate van eilandvorming geen beletsel voor het ontstaan van de glasachtige toestand.

Door *fig. 4* wordt een en ander nog geïllustreerd.

Voor de practijk zijn vooral van belang de consequenties die de wisseling van het omringingsgetal en de daarmee gepaard gaande versteviging van het netwerk heeft voor de physische eigenschappen van deze groep van glazen. Bij wijze van voorbeeld ziet men in *fig. 5* de uitzettingscoëfficient van de zuivere natriumboraatglazen als functie van de samenstelling. Deze curve vertoont een minimum, juist bij de samenstelling waarbij volgens de voorafgaande beschouwingen het netwerk op de stevigste wijze is opgebouwd.

Iets dergelijks vindt men voor de borosilicaatglazen. Op de scheidingslijn van het accumulatiegebied en het afbraakgebied (*fig. 6*) bevinden zich die glazen die, vergeleken bij andere borosilicaatglazen, gekenmerkt zijn door een maximale sterkte van opbouw (kleine uitzettingscoëfficient en een hoge verwekingstemperatuur), o.a. de zg. „Pyrex"-glazen.

De vermelde wisseling van het omringingsgetal van het B^{3+}-ion is er in wezen dus verantwoordelijk voor, dat het B_2O_3, dat zelf een zeer grote uitzettingscoëfficient heeft en zeer gemakkelijk smelt, als component in glas onder geschikt gekozen omstandigheden een vermindering van de uitzettings-

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

coëfficient en een verhoging van de verwekingstemperatuur ten gevolge heeft. Ook allerlei andere eigenschappen van het glas worden door de beschreven structuurwijziging beïnvloed, zo bijv. de diëlectrische verliezen. Hierop zullen wij in een binnenkort in dit tijdschrift te publiceren artikel uitvoeriger ingaan.

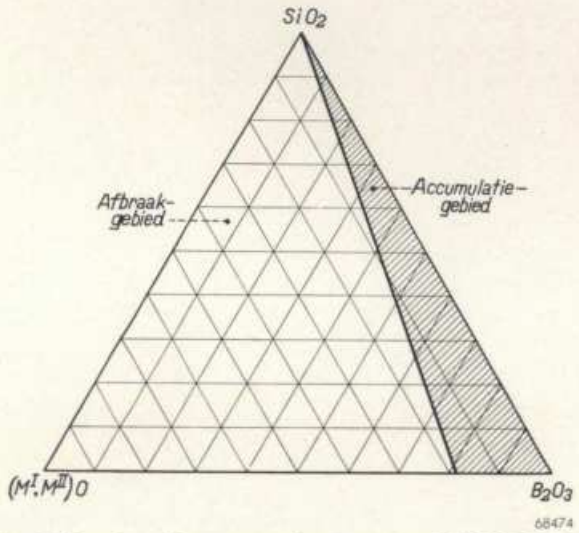


Fig. 6. Het phasediagram van het systeem $(M^I\ M^{II})O\text{-}B_2O_3\text{-}SiO_2$, waarin M^I en M^{II} een eenwaardig resp. een tweewaardig metaal voorstellen, die in een willekeurige mengverhouding kunnen voorkomen. Het diagram kan worden verdeeld in een accumulatiegebied en een afbraakgebied.

Vervaging van de begrippen netwerkvormend en netwerkwijzigend ion

Terwijl Zachariasen meende de positieve ionen te kunnen indelen in twee groepen, die hierboven werden aangeduid als netwerkvormende en netwerkwijzigende ionen, is men langzamerhand gaan inzien dat dit niet vol te houden is. Het is thans bekend dat er een groot aantal ionen zijn die in beide vormen in glas kunnen voorkomen, en wel vaak tegelijkertijd. Dit betekent dat er in glas sommige individuen van een bepaalde ionensoort 4 zuurstofionen als omringing hebben, dus in het centrum zitten van de tetraëders die het voor glas typische netwerk vormen, terwijl de overige aanwezige individuen van die ionensoort door een groter aantal zuurstofionen omringd zijn. De ligging van het „evenwicht" tussen de beide vormen kan men in een aantal gevallen globaal nagaan door de kleur van het glas; zo bijv. bij het nikkelion. Ni^{2+}-ionen kunnen in een glas hoofdzakelijk als netwerkvormende ionen voorkomen, in welk geval het glas een purperen kleur heeft; onder andere omstandigheden treden de Ni^{2+}-ionen voornamelijk als netwerkwijzigende ionen op, met het gevolg dat het glas geel is. Soortgelijke kleurverschillen bij wisseling van het omringingsgetal zijn gevonden o.a. bij Cu^{2+}, Co^{2+}, Fe^{2+}, Fe^{3+}, Mn^{2+}, Mn^{3+} en U^{6+}. Maar ook bij niet-kleurende ionen kunnen de bedoelde wisselingen van het omringingsgetal worden vastgesteld, volgens een methode die onlangs is aangegeven [6]) en waarop we in het reeds aangekondigde artikel zullen ingaan.

Hoe het „evenwicht" tussen de omringingsvormen zich instelt, hangt behalve van een aantal uitwendige omstandigheden (temperatuur en ovenatmosfeer bij het bereiden van het glas, snelheid van afkoeling) in hoge mate er van af, in welke hoeveelheden de verschillende ionen in het glas aanwezig zijn. Men heeft dit feit, waarvoor de eenvoudige beschouwingswijze van Zachariasen geen verklaring kan geven, begrijpelijk gemaakt door middel van een „concurrentieprincipe". In het algemeen zullen de kleine, hoog geladen ionen, die de zuurstofionen dicht naar zich toe kunnen trekken en deze sterk kunnen binden, zich gemakkelijk omringen met slechts 4 zuurstofionen (of 3 in het geval van B^{3+}). De grotere en lager geladen kationen worden dan omringd door een groter aantal zuurstofionen, waaraan zij minder sterk gebonden zijn. In principe echter zullen ook deze laatste kationen in een 4-omringing kunnen optreden, dwz. zij treden in concurrentie met de kleine, hoog geladen ionen. Hierbij kunnen zij succes hebben, bijv. als er relatief weinig zuurstofionen aanwezig zijn.

Verschillende onderzoekers hebben geprobeerd dit concurrentievermogen van de ionen in getallen uit te drukken. Een heel geschikte maat is gebleken te zijn de „veldsterkte" van het ion ter plaatse van het middelpunt van een er aan rakend zuurstofion, Z/a^2, waarin Z de lading van het ion is en a de afstand tussen de middelpunten der twee elkaar rakende ionen [7]). Rangschikt men de ionen volgens de berekende veldsterkte (zie *tabel I*), dan geeft de verkregen volgorde een beeld van de voorkeur die de diverse ionen hebben om hetzij als netwerkvormend hetzij als netwerkwijzigend ion op te treden. Komen verschillende kationen tegelijk in een glas voor, dan zullen die met de hoogste waarde van Z/a^2 bij voorkeur de netwerkvormende posities (kleinste omringingsgetallen), die met de laagste waarde van Z/a^2 de netwerkwijzigende posities (grootste omringingsgetallen) innemen.

Enkele markante voorbeelden mogen dit toelichten.

Indien silicium-ionen en phosphor-ionen met elkaar in concurrentie treden, zoals in het glas van de samenstelling SiP_2O_7 (d.i. $SiO_2.P_2O_5$), is het

[6]) J. M. Stevels, Verres et Réfractaires **2**, 2, 1948.
[7]) A. Dietzel, Glastechn. Ber. **22**, 41, 1948.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

volgens de tabel te voorzien dat de phosphor-ionen het zullen „winnen". Het is moeilijk, bij dit glas rechtstreeks na te gaan met welke omringingsgetallen de ionen Si^{4+} en P^{5+} hierin voorkomen. Ook het kristallijne SiP_2O_7 is in dit opzicht nooit onderzocht, wel echter het hiermee isomorfe kristallijne ZrP_2O_7. Hierbij is inderdaad door röntgendiffractie-analyse gebleken dat ieder P^{5+}-ion is omgeven door 4 brugzuurstofionen, en ieder Zr^{4+}-ion door 6 brugzuurstofionen. Daar men wel mag aannemen dat in de glasachtige toestand de omringingsgetallen dezelfde zullen zijn als in de kristallijne, zien wij dus hier een geval waarin Si^{4+} in een 6-omringing optreedt, dwz. dat het Si^{4+}-ion, de glasvormer par excellence, slechts een netwerkwijzigende positie inneemt.

Tabel I. „Veldsterkte" Z/a^2 voor een aantal kationen, volgens Dietzel [7]); Z = lading van het ion, uitgedrukt in elementaire ladingen; a = afstand (in ångström) van het middelpunt van het ion tot het middelpunt van een er aan rakend zuurstofion. (Is het kation vrij groot, dan past het niet meer in de holte van een uit vier zuurstofionen gevormde tetraëder en is het meest natuurlijke omringingsgetal alleen om deze reden al groter dan 4.)

Ion \ Omringingsgetal	3	4	6	8
P^{5+}		2,08		
B^{3+}	1,65	1,45		
Si^{4+}		1,57		
Al^{3+}		0,97	0,84	
Zr^{4+}				0,78
Be^{2+}		0,87		
Ni^{2+}		0,61	0,55	
Zn^{2+}		0,59	0,53	
Mg^{2+}		0,51	0,45	
Ca^{2+}			0,35	0,33
Ba^{2+}				0,24
Li^{+}			0,23	
Na^{+}			0,19	0,17
K^{+}				0,13

Een tegenovergesteld effect ziet men in het volgende voorbeeld. Van de verbinding $2CaO.SiO_2$ is alleen een kristallijne vorm bekend. Dit strookt met de boven weergegeven beschouwingen over y en R: er is hier op 4 zuurstofionen slechts één glasvormend ion, dus $R = 4$ en derhalve, volgens verg. (1), $y = 0$. De stof is dus wel opgebouwd uit SiO_4-tetraëders, maar deze zijn alle geïsoleerd en rangschikken zich derhalve tot een in hoge mate geordende structuur, met Ca^{2+}-ionen als „lijm". Het merkwaardige nu is, dat de geheel analoge verbinding $2ZnO.SiO_2$ wel degelijk in de glasachtige toestand kan voorkomen. Voor een verklaring hiervan kan men steunen op het feit dat Zn^{2+} in tabel I enkele trappen hoger staat dan Ca^{2+}. Men kan zich dus voorstellen dat Ca^{2+} in het beschouwde systeem uitsluitend met een omringingsgetal 6 of hoger, d.i. als netwerkwijzigend ion moet optreden, terwijl Zn^{2+} onder geschikt gekozen omstandigheden ook met een omringingsgetal 4 kan voorkomen, dus de rol van netwerkvormend ion kan spelen. Treden in de verbinding $2ZnO.SiO_2$ slechts 16,7% van de aanwezige Zn^{2+}-ionen als netwerkvormende ionen op — men kan de samenstelling dan in plaats van Zn_2SiO_4 beter schrijven als $Zn_{5/3}(Zn_{1/3}Si)O_4$ —, dan is het quotient R reeds precies tot 3 teruggebracht en is dus glasvorming mogelijk ($y = 2$). In werkelijkheid zullen wel iets meer dan 16,7% van de Zn^{2+}-ionen als netwerkvormers aanwezig zijn. De glasvorming in het systeem ZnO-SiO_2 gaat nl. nog door totdat ongeveer de samenstelling $2{,}2ZnO.SiO_2$ is bereikt. Hierbij kan aan de voorwaarde $R \leq 3$ slechts worden voldaan indien ten minste 18,2% van de Zn^{2+}-ionen een netwerkvormende positie innemen [8]).

Ook voor bepaalde bariumhoudende silicaatglazen (de zg. zware bariumkroonglazen) heeft men aangetoond dat hierin een aantal bariumionen aanwezig zijn die deel uitmaken van een typische tetraëderformatie. Zelfs Ba^{2+}-ionen kunnen dus wel eens de rol van netwerkvormende ionen spelen.

Vatten we nog even samen wat er gewonnen is ten opzichte van de oude theorie. Volgens de criteria van Zachariasen zouden Zn^{2+}- en Ba^{2+}-ionen zich altijd als netwerkwijzigende ionen moeten gedragen. De nieuwe zienswijze (het concurrentieprincipe) maakt begrijpelijk dat zulke ionen ook wel netwerkvormend kunnen optreden, en dat dit te eerder kan voorkomen naarmate de bedoelde ionen in grotere concentraties aanwezig zijn. Practisch is dit van groot belang, aangezien de toevoeging van eenzelfde ion tot een glas de eigenschappen in verschillende mate (of zelfs in tegengestelde richting) kan beïnvloeden, naar gelang de positie die het in het netwerk krijgt: het Mg^{2+}-ion bijv. levert als netwerkwijziger een bijdrage tot de diëlectrische verliezen van een glas bij 10^6 Hz, als netwerkvormer daarentegen is het in dit frequentiegebied onschadelijk.

---

[8]) Hierbij is dus stilzwijgend aangenomen dat de in de practijk gevonden grens voor het optreden van de glasachtige silicaten ($R = 3$) eveneens zou gelden voor de glazen die Si^{4+} en weinig Zn^{2+} als netwerkvormende ionen bevatten. A priori behoeft dit niet strikt het geval te zijn, doch zou de grens bij iets grotere R ($y < 2$) kunnen liggen (vgl. de phosphaat- en boraatglazen). Dan zouden reeds kleinere percentages aan netwerkvormende Zn^{2+}-ionen voldoende zijn om voor de genoemde samenstellingen de glasvorming te verklaren.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

De invloed van de aard der binding op de glasvorming

Nog op een ander punt heeft de theorie van Zachariasen in de laatste jaren een belangrijke evolutie ondergaan. Terwijl Zachariasen zich in het geheel niet uitliet over de aard van de binding in glasachtige systemen en bovendien zijn bouwstenen (de polyeders) als onveranderlijk beschouwde, is de laatste jaren vooral door Duitse onderzoekers er op gewezen, dat het wezen van de chemische binding in de bouwstenen van groot belang is bij de vraag of een bepaalde stof al of niet in de glasachtige toestand kan voorkomen. Smekal, op wiens naam deze theorie in hoofdzaak te stellen is, heeft plausibel gemaakt [9]) dat een voorwaarde voor glasvorming is, dat het systeem gemengde bindingen bevat. Daarmee wordt bedoeld dat hierin naast gerichte bindingskrachten (homopolaire bindingen, die tot bepaalde onderlinge „valentiehoeken" beperkt zijn, zoals bijv. in CO_2 of NH_3 of $SiCl_4$) ook ongerichte bindingskrachten (heteropolaire binding of Van der Waals-binding) werkzaam moeten zijn. De twee soorten bindingskrachten kunnen verenigd zijn in één bindingsrichting, zoals bijv. in de Si-O-binding, die men moet beschrijven als combinatie van een kracht van het type van een homopolaire binding en één van het type van een heteropolaire binding, òf zij kunnen aanwezig zijn in verschillende bindingsrichtingen. Het laatste geval zien wij bijv. bij het glasachtige selenium en bij de ketenvormige macromoleculen, waarbij in de richting van de ketens een homopolaire binding heerst terwijl de ketens onderling in hoofdzaak door een Van der Waals-binding bijeen worden gehouden [10]).

Deze beschouwingen zijn van groot belang, omdat zij betrekking hebben op alle glassoorten, in tegenstelling tot de beschouwingen van Zachariasen, die uitsluitend gelden voor glassoorten gevormd door oxyden.

Men kan het verschil tussen de theorie van Smekal en die van Zachariasen zo formuleren, dat de laatste de onregelmatige bouw van het netwerk uitsluitend toeschrijft aan de onregelmatige aaneenlegging van de zuurstofpolyeders. Volgens de theorie van Smekal, toegepast op de oxydeglazen, komt daar nog bij dat het bindingstype binnen de polyeders kan veranderen, doordat de binding een meer homopolair dan wel meer heteropolair karakter gaat dragen. Daardoor kunnen dus interatomaire afstanden in die polyeders veranderen, hetgeen ook kan bijdragen tot de onregelmatige bouw van de netwerken in glasachtige systemen.

Anorganische glazen waarbij de regels van Zachariasen falen

Heeft men eenmaal deze gedachtengang als juist aanvaard, dan zal men het niet vreemd vinden dat er anorganische systemen zijn die in het geheel niet aan de regels van Zachariasen voldoen en die toch in de glasachtige toestand voorkomen.

Schakelen wij de gevallen die op selenium lijken uit (zoals glasachtig zwavel en tellurium), dan is het oudste bekende voorbeeld wel het systeem van carbonaten K_2CO_3-$MgCO_3$. Volgens de beschouwingen van Zachariasen, toegepast op het oxyde CO_2, zou hier geen sprake van glasvorming kunnen zijn. Men zou veeleer een regelmatig kristalrooster verwachten, gevormd door de positieve metaalionen en negatief geladen CO_3^{2-}-groepen. Men heeft nu gevonden dat verhitting van een mengsel van K_2CO_3 en $MgCO_3$ in aequimoleculaire hoeveelheden wel degelijk tot glasvorming leidt. Het glas heeft weliswaar een sterke ontglazingsneiging: bij 300 °C ontglaast het in een uur volledig; bij temperaturen beneden 150 °C echter is het houdbaar. Geheel analoge systemen, zoals $Na_2Ca(CO_3)_2$, $K_2Ca(CO_3)_2$, $Na_2Mg(CO_3)_2$, $NaLiCO_3$ en $KLiCO_3$, vertonen daarentegen geen spoor van glasvorming.

Ziet men naar tabel I, dan merkt men op dat, van alle hier in het geding komende kationen, juist K^+ en Mg^{2+} het meest in „veldsterkte" verschillen. Het feit dat uit de vermelde reeks alleen $K_2Mg(CO_3)_2$ een glas vormt, wijst er dus op dat het de combinatie van een zeer zwak en een veel sterker kation is die hier een gunstige conditie voor de glasvorming schept. Men kan dit dan ook zo interpreteren dat de in het systeem heersende sterk wisselende electrische velden de CO_3^--groepen op verschillende wijze deformeren, waardoor, volgens de gedachte van Smekal, de glasvorming wordt bevorderd.

Iets analoogs heeft men bij de nitraten gevonden. Een mengsel van aequimoleculaire hoeveelheden $Ca(NO_3)_2$ en KNO_3, afgekoeld uit de gesmolten toestand, wordt glasachtig. In het systeem $Ca(NO_3)_2$-$NaNO_3$ treedt het verschijnsel niet op. Het verschil in sterkte van het Ca^{2+}- en het Na^+-ion is blijkbaar niet groot genoeg voor een voldoende deformatie der NO_3^--groepen. Anderzijds moet men nu verwachten dat het systeem $Mg(NO_3)_2$-KNO_3 wèl in de glasachtige toestand zal voorkomen. Het is ons

---

[9]) A. Smekal, Nova Acta Leopoldina **11**, 511, 1942; nader uitgewerkt in Glastechn. Ber. **22**, 278, 1949.

[10]) In het licht van deze beschouwingen zal men inzien dat de met het criterium van Dietzel — dat geheel op een heteropolair beeld is gebaseerd — verkregen rangschikking der ionen theoretisch moeilijk te rechtvaardigen is. Niettemin is het als heuristisch en didactisch principe zeer nuttig gebleken.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

gebleken dat dit inderdaad het geval is. Men kan dit niet zo heel gemakkelijk aantonen, doordat watervrij $Mg(NO_3)_2$ moeilijk chemisch zuiver te bereiden is. De door ons gevolgde procedure bestond daarin, $Mg(NO_3)_2.4H_2O$ in een platina kroes te

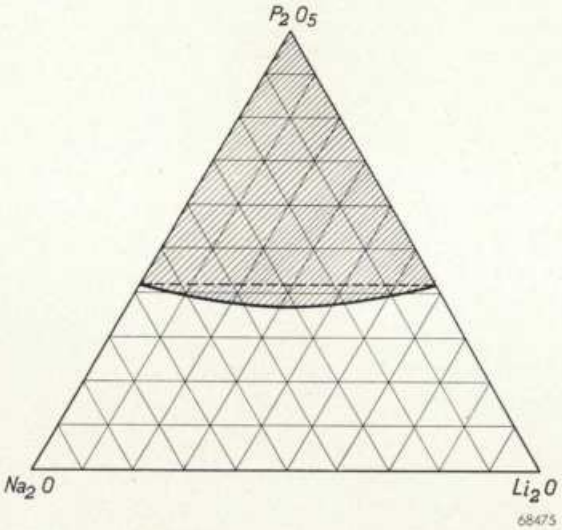


Fig. 7. Phasediagram van het systeem Na_2O-Li_2O-P_2O_5. Bij elke samenstelling in het gearceerde gebied kan de glasachtige toestand gerealiseerd worden. (Fig. 7 en 8 zijn ontleend aan de in noot [11]) aangehaalde publicaties van Bastress.)

smelten (hetgeen bij 92 °C gebeurt) en dan voorzichtig verder te verhitten. Al het aanwezige water wordt dan verdreven. Zodra de smelt nitreuze dampen begint te ontwikkelen (d.i. bij ongeveer 290 °C), voegt men een aequimoleculaire hoeveelheid KNO_3 toe. De verkregen homogene smelt van $KMg(NO_3)_2$ wordt zeer snel afgekoeld, nl. door ze in de vorm van kleine druppels in vloeibare lucht uit te gieten; er ontstaat dan een glasachtig product, zoals met behulp van röntgendiffractie-opnamen werd aangetoond.

Bij de sulfaten heeft men een nog sprekender geval. Het systeem K_2SO_4-$MgSO_4$ levert, ondanks het grote sterkteverschil tussen het K^+- en het Mg^{2+}-ion, bij geen enkele samenstelling een glasachtige stof op. Vervangt men echter het Mg^{2+}-ion door een ion met een nòg sterker veld, nl. het H^+-ion, dan wordt glasvorming mogelijk: door $KHSO_4$ even boven het smeltpunt te verhitten en dan snel af te koelen (de ontglazingsneiging is weer vrij groot) door uitgieten op een ijzeren plaat, krijgt men een glas. Bij een temperatuur van 70 °C kan men van dit glas draden trekken.

Een bijzondere fraaie bevestiging voor de gedachten van Smekal ten slotte heeft men gevonden in het domein van de normale oxydeglazen zelf [11]).

[11]) A. W. Bastress, Glass Science Bull. **4**, 133, 1946; **6**, 9, 1947; **6**, 12, 1947.

Volgens het boven uiteengezette treedt in een systeem als bijv. Na_2O-B_2O_3 glasvorming op, zolang de hoeveelheid Na_2O een bepaald percentage niet overschrijdt, dat overeenkomt met een waarde van $R \approx 2{,}4$. Dezelfde grenswaarde vindt men voor het systeem K_2O-B_2O_3. Beschouwt men echter de gemengde alkali-boraten, zoals het systeem Na_2O-K_2O-B_2O_3, dan vindt men dat hierin soorten glas voorkomen waarbij R aanmerkelijk groter dan de genoemde grenswaarde is. Ook bij de gemengde alkali-silicaten en -phosphaten heeft men hetzelfde verschijnsel, zoals voor het geval van enkele systemen wordt geïllustreerd door de phasediagrammen in *fig. 7* en *8*. Wat betreft de waarde van R, zou men verwachten dat het gebied van glasvorming in elk diagram door de stippellijn zou worden begrensd; in werkelijkheid treedt in het gehele gearceerde gebied glasvorming op. Het meest opvallende nu is hierbij dat de procentuele toeneming van het glasvormingsgebied in het algemeen groter is naarmate de betrokken kationen volgens tabel I meer in „veldsterkte" verschillen; zie als voorbeeld *tabel II*. Dit levert de verklaring van het gehele verschijnsel. De grenswaarde van R immers hield verband met het feit dat bij toenemend aantal zuurstofionen de, oorspronkelijk als star beschouwde, polyeders ten slotte hun onderlinge samenhang in een steeds ijler wordend netwerk niet kunnen handhaven. Door de sterk wisselende electrische velden worden echter de zuurstofpolyeders zèlf enigszins gedeformeerd. Deze deformatie maakt het mogelijk dat ook bij iets

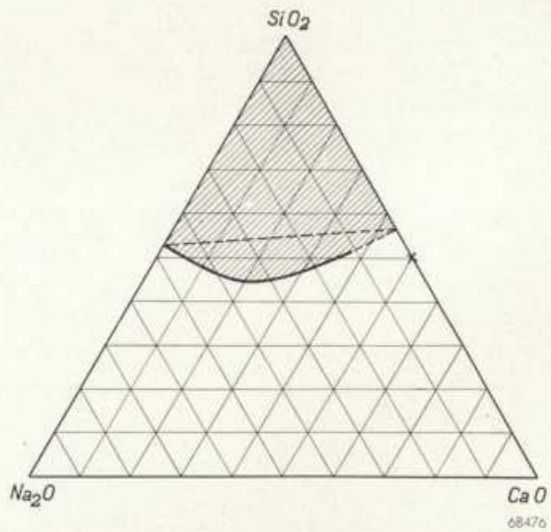


Fig. 8. Phasediagram van het systeem Na_2O-CaO-SiO_2. Bij elke samenstelling in het gearceerde gebied kan de glasachtige toestand gerealiseerd worden. — Volgens J. B. Ferguson en H. E. Merwin (Amer. J. Sci. **48**, 81, 1919) kan, in afwijking van deze figuur, een stof met de samenstelling $CaO.SiO_2$ (in de figuur door een kruisje aangegeven) nog juist in de glasachtige toestand voorkomen; hier is dus $R = 3$.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Tabel II. Procentuele verruiming van het gebied van glasvorming in het phasediagram van gemengde alkali-boraten, vergeleken met het gebied waarin aan de voorwaarde betreffende R is voldaan [11]).

Systeem	Toeneming in %
Na_2O-K_2O-B_2O_3	15
Na_2O-Li_2O-B_2O_3	50
Li_2O-K_2O-B_2O_3	100

grotere R (kleinere y) nog een samenhangend glasachtig netwerk wordt gevormd.

Resumerend kunnen wij zeggen dat dank zij de recente verfijningen van de theorie van Zachariasen vele details van het verschijnsel der glasvorming beter kunnen worden begrepen. In het bijzonder is het bestaan van allerlei glassoorten die niet in het oude schema pasten, begrijpelijk geworden, terwijl de nieuwe inzichten tevens als leidraad kunnen dienen — en reeds in vele gevallen hèbben gediend — bij het zoeken naar nieuwe glazen, met geheel nieuwe combinaties van eigenschappen.

Samenvatting. De theorie van Zachariasen geeft voor oxyden aan, onder welke voorwaarden deze in de glasachtige toestand kunnen voorkomen. Deze voorwaarden volgen uit een voorstelling van de structuur van glas als onregelmatig netwerk van zuurstoftetraëders (of -driehoeken), in welker centra zich de kleine, hoog geladen ionen B^{3+}, Si^{4+} of P^{5+} (netwerkvormers) bevinden, terwijl in de holten van het netwerk tevens allerlei grote, lager geladene, kationen, door een groter aantal zuurstofionen omringd, als netwerkwijzigers kunnen zijn opgenomen. Volgens nieuwe inzichten moet dit beeld in enkele opzichten worden verfijnd. De omringingsgetallen liggen niet in die mate vast als eerder werd aangenomen. Reeds B^{3+} kan overgaan van een omringing met 3 tot een omringing met 4 zuurstofionen, waardoor diverse verschijnselen bij boraatglazen kunnen worden verklaard. Verder kunnen typische netwerkwijzigers (met normale omringing door bijv. 6 of 8 zuurstofionen) onder bepaalde omstandigheden als netwerkvormers (met 4-omringing) fungeren, en omgekeerd. Het gedrag der kationen in dit opzicht wordt beheerst door een concurrentieprincipe, dat in een ranglijst volgens „veldsterkte" zijn uitdrukking vindt. Volgens Smekal is de diepere grond voor het ontstaan van de glasachtige toestand het optreden van bindingskrachten van verschillend type tussen de deeltjes in het netwerk. Vele feiten die door de theorie van Zachariasen niet werden omvat resp. hiermee in strijd waren, vinden daarmee een plausibele verklaring. Een en ander wordt door een reeks voorbeelden toegelicht.

OVERZICHT VAN RECENTE WETENSCHAPPELIJKE PUBLICATIES DER N.V. PHILIPS' GLOEILAMPENFABRIEKEN

Van deze publicaties, voor zover niet met een sterretje * gemerkt, verstrekt de Administratie van het Natuurkundig Laboratorium, Kastanjelaan, Eindhoven, op aanvrage overdrukken.

1951 : H. O. Huisman: Investigations on quinones and quinone-derivatives. Preparation and antibiotic properties of some substituted p-benzo- and p-toluo-quinones, hydroquinones and hydroquinone esters (Rec. Trav. chim. Pays-Bas **69**, 1113-1156, 1950, No. 9/10).

De antibiotische eigenschappen van de in de titel genoemde verbindingen werden in vitro onderzocht op een gistsoort, diverse schimmels en twee soorten (Gram-positieve en Gram-negatieve) micro-organismen. De toxiciteit werd bij witte muizen bepaald door toediening per os en door onderhuidse inspuiting. De chemotherapeutische werkzaamheid werd onderzocht bij witte muizen die met een dodelijke dosis pneumokokken waren ingespoten.

1952*: P. Cornelius: Electrische eenheden en het Giorgi-stelsel (Electrotechniek **28**, 454-460 en 473-479, 1950, No's 23 en 24).

Overzicht van het Giorgi-stelsel; zie ook No's **R 103, R 111, R 151** en Philips techn. T. **10**, 55-60, 79-86, 1948.

1953 : J. M. Stevels: Le fer dans le verre (Verres et Réfractaires **4**, 293-298, 1950, No. 5).

Het gedrag van ijzer in glas hangt nauw samen met de wisselende valentie, welke electronenovergangen mogelijk maakt. Ionen Fe^{3+} veroorzaken in netwerkvormende posities een bruinkleuring, in netwerkwijzigende posities practisch geen kleuring. Ionen Fe^{2+} treden zelden alléén op en meestal als netwerkwijzigende, soms ook als netwerkvormende ionen. Deze ionen veroorzaken op zichzelf geen zichtbare verkleuring. De blauw-groenachtige kleur van glas dat ijzer bevat, is te danken aan de gelijktijdige aanwezigheid van Fe^{2+}- en Fe^{3+}-ionen. Er zijn aanwijzingen dat althans één dezer ionen (of beide) als netwerkvormend ion aanwezig moet zijn. Belangrijk is in dit verband de rol van Ti^{4+}-ionen, omdat deze het evenwicht tussen netwerkvormende en netwerkwijzigende posities der Fe-ionen in de eerstgenoemde richting verschuiven. Misschien is de ontkleuring ten slotte terug te brengen tot een verwijdering van TiO_2. Nadere studie van het evenwicht $Fe^{2+} \rightleftarrows Fe^{3+}$, zowel in netwerkwijzigende als in netwerkvormende positie, is gewenst.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

1954*: A. Claassen: Titan (Hb. Anal. Chem., Dritter Teil, Band IVb, Springer Berlin 1950, pp. 1-169).

Systematisch overzicht van de quantitatieve methode voor de bepaling van titanium en van de thans bekende scheidingsmethoden.

1955*: A. Claassen: Zirkon und Hafnium (Hb. Anal. Chem., Dritter Teil, Band IVb, Springer Berlin 1950, pp. 170-287).

Systematisch overzicht van de quantitatieve methoden voor afscheiding en bepaling van zirconium en hafnium en van de voornaamste thans bekende scheidingsmethoden.

1956 : J. L. Snoek: Density variations in aluminium (Phil. Mag. **41**, 1188-1192, Nov. 1950).

Uit een nauwkeurige bepaling van de dichtheid van aluminium-monsters wordt de conclusie getrokken dat kristalgrenzen een ijlere structuur kunnen hebben dan tot nu toe werd aangenomen. In een addendum wordt de mogelijke invloed van ingesloten gasbellen op de dichtheid in discussie gebracht.

1957: C. J. Bouwkamp: On Sommerfeld's surface wave (Phys. Rev. **80**, 294, 1950, No. 2).

Critische discussie van recente publicaties van Kahan en Eckart over de „oppervlaktegolf" die optreedt bij de beschouwingen van Sommerfeld over de uitbreiding van electromagnetische golven over een vlakke aarde.

1958: J. M. Stevels: The relation between the dielectric losses and the composition of glass (J. Soc. Glass Technology **34**, 80-100, 1950, No. 158).

Bespreking van de theorie van diëlectrische verliezen in glas. Verliezen zijn te verwachten in verband met 1) relaxatieverschijnselen, veroorzaakt door de netwerkwijzigende ionen, 2) relaxatieverschijnselen veroorzaakt door het netwerk, 3) trillingen van de atomen van het netwerk en van de netwerkwijzigende atomen. De afhankelijkheid van ieder dezer soorten verliezen van frequentie en temperatuur wordt besproken. De theorie wordt vergeleken met experimentele resultaten. Nader wordt besproken hoe de diverse soorten verliezen afhangen van de samenstelling.

1959: F. A. Kröger en J. van den Boomgaard: The fluorescence of magnesium germanate activated by manganese (J. Electrochem. Soc. **97**, 377-382, 1950, No. 11).

Bij magnesiumgermanaat geactiveerd met mangaan kan deze activator in verschillende waardigheden optreden. Als de waardigheid groter is dan twee, heeft fluorescentie plaats in de vorm van een spectrum bestaande uit een aantal smalle banden die alle dezelfde nalichtduur vertonen. De variatie van de nalichtduur en van de intensiteit van de fluorescentie met de temperatuur kan worden verklaard op grond van de onderstelling dat de relatieve bijdrage van stralingsloze overgangen en overgangen met straling bepaald wordt door een Boltzmann-evenwicht tussen de bezettingen van diverse aangeslagen toestanden.

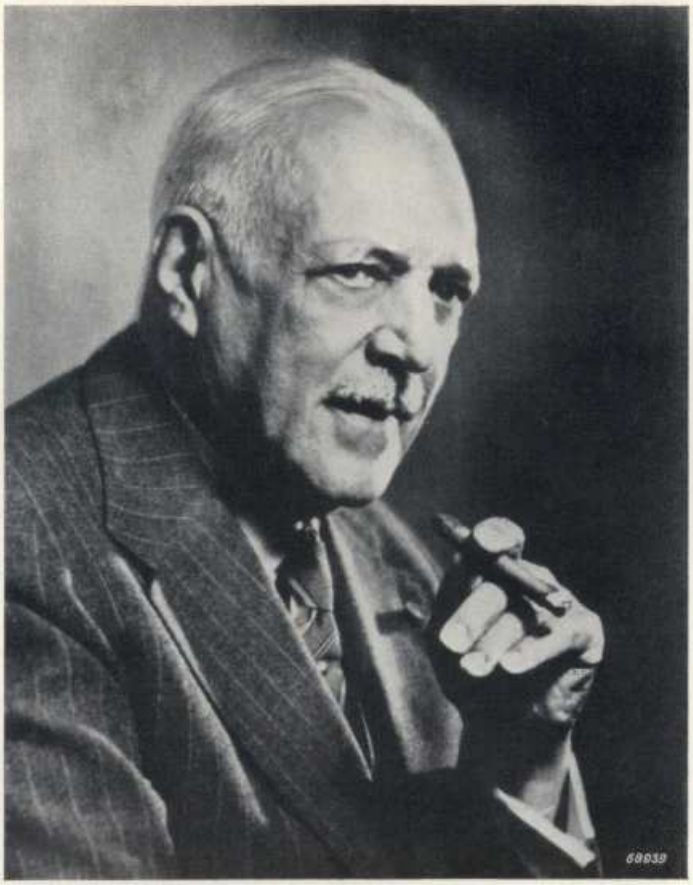
1960: J. A. Haringx: The rigidity of corrugated diaphragms (Appl. sci. Res. **A2**, 299-325, 1950, No. 4).

Door een gegolfd membraan te vervangen door een denkbeeldige vlakke plaat met overeenkomstige eigenschappen is het mogelijk een lineaire differentiaalvergelijking voor de doorbuiging af te leiden. De coëfficienten van deze vergelijking variëren op een zeer gecompliceerde wijze met de dikte, en de oplossing voor het met gelijkmatig verdeelde druk belaste membraan wordt dan ook slechts gegeven voor dikke en voor dunne platen afzonderlijk. Bij dikke platen blijkt het profiel van de golf niet essentieel te zijn, terwijl het bij dunne platen noodzakelijk is onderscheid te maken tussen trapeziumvormige, driehoekige en cirkelboogvormige golven. Door een voor de hand liggende kunstgreep worden de resultaten voor dikke en voor dunne platen aan elkaar gepast, zodat ook de doorbuiging voor het tussenliggende gebied van middelmatige plaatdikten bepaald kan worden. De eindresultaten der berekeningen worden vergeleken met metingen die door anderen zijn uitgevoerd; zij blijken in goede overeenstemming te zijn met de experimenten.

Opgemerkt wordt dat, vergeleken op basis van kleine doorbuigingen, het aanbrengen van golven in de plaat tot een aanzienlijke verhoging van de stijfheid leidt. De algemeen heersende opvatting, dat de vlakke plaat stijver is dan het gegolfde membraan, is alleen juist bij grote doorbuigingen als gevolg van de bij de vlakke plaat aanwezige niet-lineaire betrekking tussen de belasting en de doorbuiging.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



IN MEMORIAM
Dr. h.c. A. F. PHILIPS

IN de vroege ochtend van Zondag 7 October 1951 overleed Anton Frederik Philips, een van de stichters van het Philips Concern, op de leeftijd van 77 jaar. A. F. Philips was op 14 Maart 1874 te Zaltbommel geboren. Door zijn vader, B. F. D. Philips, zelf bankier, was hij aanvankelijk bestemd voor het bankbedrijf. In 1895, op de leeftijd van 20 jaar, werd hem verzocht, zijn 16 jaar oudere broer, G. L. F. Philips, bij te staan in de ontwikkeling van de in 1891 te Eindhoven opgerichte gloeilampenfabriek, waarbij hij het commerciële gedeelte voor zijn rekening moest nemen. Niet alleen slaagde hij er in, het jonge bedrijf door de eerste moeilijke jaren heen te helpen, maar bovendien werd hij spoedig, naast zijn broeder, de stuwende kracht van deze industrie.

Hij was diep overtuigd van de noodzakelijkheid van wetenschappelijk onderzoek. Het stichten van een nieuw gebouw voor het — in 1914 opgerichte — Natuurkundig Laboratorium was een van zijn eerste daden nadat hij, door het aftreden van zijn broer in 1922, de enige leider van het concern was geworden. Hoewel hij zelf geen technicus was, presideerde hij meermalen met grote bekwaamheid technische besprekingen in het laboratorium, wanneer het er om ging, de ontwikkeling van een belangrijk nieuw product te bevorderen.

In 1939 trad Dr. Philips af als president-directeur, doch in de volgende jaren, 1940-'45, was hij in de Verenigde Staten nog werkzaam in het belang van het concern en zijn overzeese betrekkingen.

In Mei 1951 was hij, als gevolg van zijn slechte gezondheidstoestand, niet in staat, persoonlijk deel te nemen aan de feestelijkheden ter gelegenheid van het zestigjarig jubileum van de Philips-fabrieken, maar door middel van de televisie werd het hem mogelijk gemaakt de voornaamste gebeurtenissen van de viering te volgen, hetgeen hij met de meeste belangstelling deed.

Tot het laatste ogenblik had hij volledig interesse voor de toekomstproblemen van de Philips-industrie.

Met het Philips-personeel over de hele wereld rouwen de laboratoriumstaven bij het verscheiden van deze bijzondere mens, aan wiens ontembare stuwkracht zij voor een groot deel hun voldoening gevende werkkring te danken hebben.

REDACTIE PHILIPS TECHNISCH TIJDSCHRIFT

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!